



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
FACULTAD DE INFORMÁTICA**

Especialización en Redes y Seguridad

"Trabajo Final presentado para obtener el grado de Especialista en Redes y Seguridad"

**INTERNET DE LAS NANO-COSAS: ESTADO DEL ARTE Y
TENDENCIAS**

Autor

Mainor Alberto Cruz Alvarado

Directora

Dra. Patricia Bazán

Asesor Científico

Mg. Nicolás del Río

La Plata - Buenos Aires, Argentina.
Diciembre 2017

Índice de Contenidos

Índice de figuras	iii
Índice de tablas	iii
CAPÍTULO I. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Metodología de la investigación	3
1.4.1. Preguntas de investigación	4
1.4.2. Logística de búsqueda	4
1.4.3. Criterios de inclusión/exclusión	6
1.4.4. Proceso inicial	6
1.4.5. Proceso final de selección	7
1.5. Resultados esperados	8
CAPÍTULO II. Definiciones y características de IoNT	9
2.1. Propósito de IoNT	9
2.2. Nano-comunicación	11
2.2.1. Comunicación molecular	12
2.2.2. Nano-comunicación electromagnética	13
2.3. Arquitectura de IoNT.....	14
2.3.1. Arquitectura de red.....	14
2.3.2. Arquitectura de nano-máquinas	15
2.4. Dominios de IoNT	16
2.4.1. Internet de las Nano-Cosas Multimedia (IoMNT).....	16
2.4.1. Internet de las Bio-Nano Cosas (IoBNT).....	19
CAPÍTULO III. Capacidades y posibilidades de IoNT	21
3.1. Nanotecnología.....	21
3.2. Seguridad en las nano-cosas	24
3.2.1. Seguridad en nano-comunicaciones.....	24
3.2.2. Objetivos de seguridad	24
3.2.3. Mecanismos de seguridad para los sistemas de IoNT	26
3.3. Protocolos de nano-redes.....	27
3.5. Aplicaciones de Internet de las nano-cosas	29
CAPÍTULO IV. Tendencias y desafíos de IoNT	33
4.1. Análisis de tendencias y desafíos de Internet de las nano-cosas	33
4.1.1. Método de clasificación	33
4.1.2. Definición de los criterios	34

4.1.3. Aplicación de los criterios.....	36
4.1.4. Tendencias y desafíos	43
CAPÍTULO V. Conclusiones y trabajos futuros.....	45
Referencias bibliográficas	47
Anexos	51
Anexo I. Lista de documentos seleccionados.....	51
Anexo II. Lista total de documentos seleccionados.....	52
Anexo III. Lista de evaluación de documentos seleccionados	54

Índice de figuras

Figura 1. IoT/IoNT.	3
Figura 2. Fuentes de información.....	8
Figura 3. IoNT.	11
Figura 4. Nano-comunicación.	12
Figura 5. Arquitecturas de red para IoNT.....	14
Figura 6. Arquitectura multimedia nano-cosa.....	17
Figura 7. Elementos de una célula biológica y componentes de IoT.....	19
Figura 8. Aplicaciones de IoNT.	29
Figura 9. Resultados de criterios de tecnologías.	38
Figura 10. Resultados de criterios de aplicaciones.....	40
Figura 11. Resultado de criterios de desafíos.....	42
Figura 12. Categorías de clasificación.....	44

Índice de tablas

Tabla 1. Cantidad de documentos localizados y seleccionados.	6
Tabla 2. Campos tecnológicos.	23
Tabla 3. Amenazas y ataques contra sistemas IoNT.....	25
Tabla 4. Ideas para protocolos de nano-redes.....	28
Tabla 5. Campos y aplicaciones de IoNT.....	30
Tabla 6. Ejemplos de IoNT.....	31
Tabla 7. Categorías y criterios de clasificación.	34
Tabla 8. Lista publicaciones para la aplicación de criterios.	36
Tabla 9. Aplicación de criterios en la categoría de tecnologías de IoNT.	37
Tabla 10. Aplicación de criterios en la categoría de aplicaciones de IoNT.	39
Tabla 11. Aplicación de criterios en la categoría de desafíos.....	41
Tabla 12. Lista de documentos seleccionados.....	51
Tabla 13. Lista total de documentos seleccionados.....	52
Tabla 14. Lista de evaluación de documentos seleccionados.	54

CAPÍTULO I. Introducción

1.1. Introducción

Las nuevas corrientes tecnológicas como Internet de las cosas (IoT – *Internet of Things*) han mostrado que las computadoras no son las únicas con una puerta de acceso a Internet y que existen diversos dispositivos y objetos con esta capacidad de acceso. IoT ha brindado a los investigadores una visión minuciosa de la interconexión de objetos a Internet, y con ello ha surgido Internet de las nano-cosas (IoNT – *Internet of Nano Things*).

El enfoque del trabajo se basa en el estudio del estado actual de IoNT, que une dos enfoques donde ha habido grandes avances en los últimos años como lo son IoT y las nanotecnologías.

El objetivo de este trabajo consiste en investigar el estado del arte y analizar tendencias en la utilización de IoNT, su aplicación y desafíos a futuro en diferentes campos de interés social.

El trabajo se encuentra estructurado de la siguiente forma: el presente capítulo (Capítulo I) especifica la motivación, el objetivo y la metodología. El Capítulo II ofrece la base conceptual del estudio, detallando definiciones y características de IoNT. Las capacidades, posibilidades y ejemplos de IoNT se indican en el Capítulo III.

En el Capítulo IV se presenta el análisis de tendencias y desafíos de IoNT para su utilización y aplicación en diferentes campos de interés social de acuerdo a la clasificación de la literatura, enfatizando que las investigaciones actuales se basan en la divulgación de las tecnologías y que los aspectos de comunicación son los principales desafíos a los que se enfrentan los sistemas de IoNT.

Finalmente, en el Capítulo V se abordan las conclusiones y trabajos futuros.

1.2. Motivación

Con el pasar de los años, durante las crecientes innovaciones tecnológicas se ha visto como se han desarrollado distintos dispositivos electrónicos, los cuales han pasado de tener un tamaño significativo con características limitadas, a obtener un menor tamaño y con múltiples capacidades. Un ejemplo de ello son/es: teléfonos móviles, cámaras digitales (Capturas de 360°), nano-procesadores y sensores (temperatura, humedad, aceleración, proximidad, etc.).

Este continuo avance en las tecnologías ha conllevado a un rápido crecimiento de los entornos inteligentes (oficinas, hogares, ciudades, etc.), comprendiendo diversos enfoques, principalmente con la propósito de mejorar la calidad de vida de las personas [1].

El crecimiento de los entornos inteligentes lo que sugiere es la interconectividad de las aplicaciones y el uso del Internet, por tal razón surge lo que se conoce como Internet de las cosas (IoT – *Internet of Things*), término que se le da a los dispositivos electrónicos de variados tamaños y capacidades que están conectados a Internet [2].

IoT se ha convertido en el tema de investigación más importante en los últimos 10 años [3], cuyo objetivo se fundamenta en que los objetos cotidianos tengan capacidades de identificación, detección, interconexión y procesamiento para lograr comunicarse entre sí y con servicios a través de Internet para solucionar una necesidad específica y útil de las personas [4].

A partir de IoT se comienza hablar sobre Internet del todo (IoE – *Internet of Everything*), el cual se basa en cuatro pilares fundamentales, como lo son las personas, datos, procesos y cosas, por el contrario IoT, que se compone únicamente en las cosas [2].

En [2] se indica que el concepto de IoE se está ampliando a través del ingreso e implementación de IoNT, del que se puede decir que es la interconexión de dispositivos a nano-escala mediante el uso de redes existentes [5].

En esta misma línea, en [6] los autores indican que el IoNT nace como un nuevo paradigma de redes a partir de los avances presentados de forma simultánea entre la nanotecnología e IoT. Un ejemplo de ello se puede apreciar en la siguiente figura:

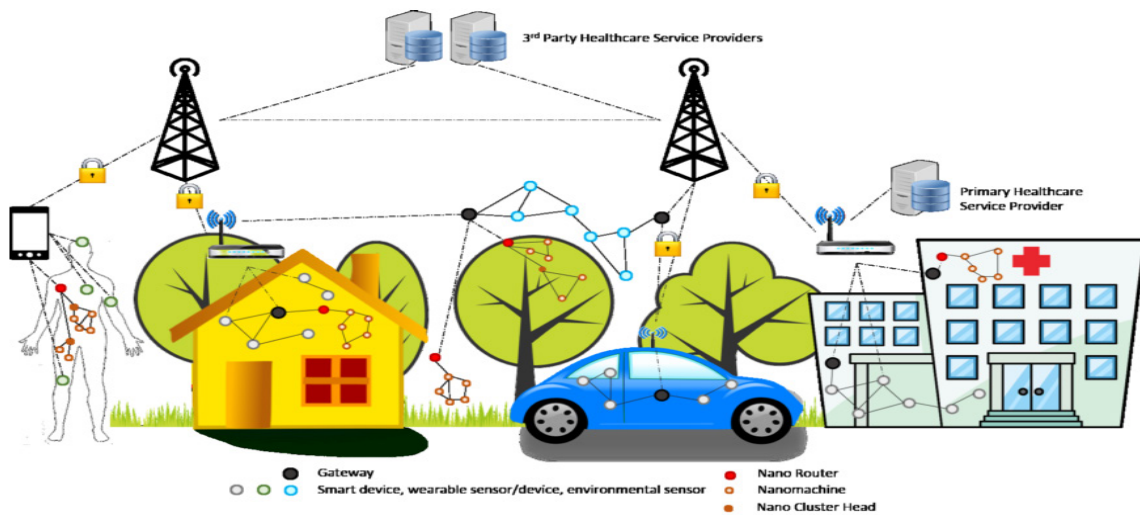


Figura 1. IoT/loNT (recuperado de [7, p. 11]).

Expuesto lo anterior, por crecimiento de las interconexiones entre los dispositivos y el desarrollo de nuevos aparatos electrónicos creados por medio de las nanotecnologías, entre otros campos, surgen diferentes desafíos en loNT, en donde se tiene previsto un mayor control y seguimiento de la información.

Algunos ejemplos de aplicación de loNT son: el monitoreo de la salud intracorporal, suministro de fármacos, plagas en agricultura, control de contaminación atmosférica y ataques biológicos y químicos [8].

En síntesis, a partir de lo descrito es importante investigar, describir alcances y tendencias, fijar funcionalidades, analizar prestaciones y complejidades de uso de loNT, ya que se presenta como una nueva opción en investigaciones relevantes para la sociedad en común, con las capacidades en involucrarse en muchos campos de importancia de bienestar social.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo consiste en investigar el estado del arte y analizar las tendencias de loNT en su utilización y aplicación en diversos campos de interés social.

Para alcanzar el objetivo propuesto, este trabajo plantea el estudio detallado del término loNT y sus características actuales, muestra las prácticas relacionadas con loNT y analiza las posibilidades y tendencias principales.

1.4. Metodología de la investigación

El trabajo se efectúa a partir de una metodología cualitativa en la que se realiza una investigación sobre el estado del arte y un análisis de las tendencias de loNT.

Se realiza una búsqueda, revisión y evaluación de la bibliografía relacionada a los temas de investigación. Esto permite establecer el estado del arte, determinar definiciones, características y posibilidades de IoNT. Además, habilita constituir una serie de criterios para el análisis de las tendencias y desafíos de IoNT.

Para la selección del material bibliográfico se consideró el trabajo de Kitchenham [9], donde se establecieron diversas composturas como lo son preguntas de investigación, palabras clave, cadenas de búsqueda y, criterios de inclusión y exclusión.

A continuación se presenta el proceso de búsqueda, revisión y evaluación del material bibliográfico. El mismo consta de 5 etapas, compuestas de la siguiente forma:

En la Sección 1.4.1 se establecen las preguntas de investigación. Luego, la Sección 1.4.2 contiene la logística de búsqueda. La Sección 1.4.3 presenta los criterios de inclusión y exclusión de los documentos. El proceso inicial de la selección de los documentos se muestra en la Sección 1.4.4. Finalmente, el proceso final de selección de documentos se exhibe en la Sección 1.4.5.

1.4.1. Preguntas de investigación

Las preguntas de investigación se basan en los objetivos planteados. Las mismas serán utilizadas para la evaluación de los documentos encontrados, dando respuesta a los objetivos de la investigación.

- ¿Define el término de IoNT?
- ¿Describe características IoNT?
- ¿Indica prácticas relacionadas de IoNT?
- ¿Exterioriza las posibilidades y tendencias de IoNT?

1.4.2. Logística de búsqueda

La logística o estrategia de búsqueda define las fuentes de información, las palabras clave y las cadenas de búsqueda utilizadas para la localización del material bibliográfico.

a) Fuentes de información

La recopilación del material se hizo a través de 3 diferentes bases de datos:

- IEEE Xplore¹

¹<http://ieeexplore.ieee.org>

- ScienceDirect²
- Springer Link³

Estas bases de datos fueron seleccionadas por el motivo de que disponen de diversos documentos (artículos, libros, conferencias, etc.) con apoyo de la comunidad científica. Del mismo modo, se utilizó buscador Google Académico⁴ para realizar las indagaciones de otros documentos.

b) Palabras clave

Las palabras clave seleccionadas son:

- Nanotecnología / *Nanotechnology*.
- Nano sensores / *Nanosensors*.
- Nano redes / *Nanonetworks*.
- Comunicaciones / *Communication*.
- Internet de las nano cosas / *Internet of nano things*.
- Arquitectura / *Architecture*.
- Aplicaciones / *Applications*.
- Desafíos / *Challenges*.

c) Cadenas de búsqueda

Las siguientes cadenas de búsqueda se conforman a partir de la combinación de palabras clave:

- Nanotecnología “Internet de las nano-cosas” / *Nanotechnology “Internet of nano things”*.
- Nano sensores “Internet de las nano-cosas” / *Nanosensor “Internet of nano-things”*.
- Arquitectura “Internet de las nano-cosas” / *Architecture “Internet of nano-things”*.
- Aplicaciones “Internet de las nano-cosas” / *Applications “Internet of nano-things”*.
- Desafíos “Internet de las nano-cosas” / *Challenges “Internet of nano-things”*.
- “Comunicación en nano redes” / *“communication in nanonetworks”*.

²<http://www.sciencedirect.com>

³<https://link.springer.com>

⁴<https://scholar.google.es>

1.4.3. Criterios de inclusión/exclusión

Los criterios consisten en descripciones por las cuales los artículos deben ser tomados en cuenta para descargar y posteriormente aplicar las preguntas de investigación.

a) Criterios de inclusión

- Documentos con descripción de características de IoNT.
- Documentos con propuestas de aplicaciones de IoNT.
- Documentos con nuevos paradigmas de comunicaciones.
- Documentos con propuestas de dispositivos basadas en nanotecnología.
- Artículos con desafíos y oportunidades de IoNT.

b) Criterios de exclusión

- Idioma.
- Documentos con texto incompleto.

1.4.4. Proceso inicial

Esta etapa se basa en la indagación de la literatura aplicando las cadenas de búsqueda y palabras clave en cada una de las bases de datos descritas en la Sección 1.4.2.

En la literatura localizada se realizaron acciones como leer el título, resumen y palabras clave. Posteriormente se aplican los criterios de inclusión y exclusión, cuyo fin consiste en obtener información relevante al tema de investigación.

La Tabla 1 presenta los documentos localizados en las fuentes de información indicadas en la Sección 1.4.2. Se muestra la cantidad de documentos encontrados, los cuales fueron resultado del uso de las cadenas de búsqueda y la cantidad de documentos seleccionados luego de aplicar los criterios de inclusión y exclusión.

Tabla 1. Cantidad de documentos localizados y seleccionados.

Palabras clave	Cadenas de búsqueda	Documentos encontrados	Documentos seleccionados
Nanotecnología / <i>Nanotechnology</i> .	Nanotecnología "internet de las nanocosas" / <i>nanotechnology "Internet of nano things"</i>	23	7
Nano sensores / <i>Nanosensors</i>	Nano sensores "internet de las nanocosas" / <i>Nanosensor "internet of nano-things"</i>	22	3

Arquitectura <i>architecture</i>	/ Arquitectura “internet de las nano-cosas” / <i>Architecture “internet of nano-things”</i>	44	3
Aplicaciones <i>Applications</i>	/ Aplicaciones “internet de las nano-cosas” / <i>Applications “internet of nano-things”</i>	62	2
Desafíos / <i>Challenges</i>	Desafíos “Internet de las nano-cosas” / <i>Challenges “Internet of nano-things”</i>	46	2
Comunicaciones en nano redes / <i>Nano communication in nanonetworks</i>	“Comunicación en nano redes” / <i>“communication in nanonetworks”</i>	72	8
Total de documentos		269	25

La aplicación de los criterios de inclusión y exclusión logró recolectar 25 documentos para su posterior lectura completa. Es importante mencionar que las literaturas fueron localizadas a la fecha de 17 de julio de 2017. La lista de estos escritos se puede observar en el Anexo I.

La lectura de los 25 trabajos seleccionados conllevó a la elección de nuevos documentos presentes en las referencias bibliográficas de cada uno de ellos. Entre los 25 documentos localizados más los seleccionados a partir de ellos se recolectaron un total de 77 trabajos.

1.4.5. Proceso final de selección

El proceso final de selección se basa en la aplicación de las preguntas de investigación indicadas en la Sección 1.4.1. De los 77 trabajos seleccionados luego de aplicar estas preguntas de investigación se consideraron un total de 67 trabajos (ver Anexos II y III).

En la Figura 2, se presenta la distribución de los documentos localizados. 41 de ellos fueron recolectados en las fuentes de información indicadas en la Sección 1.4.2 y 26 de ellas se encontraron en revistas y congresos a través del motor de búsqueda Google Académico.

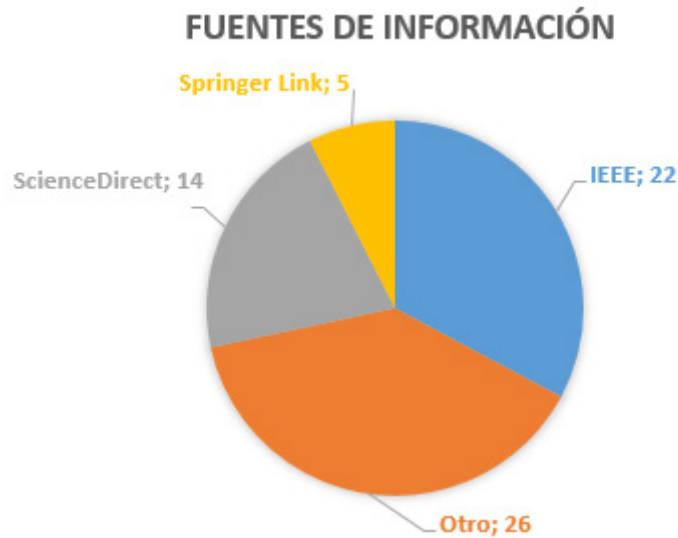


Figura 2. Fuentes de información (figura de elaboración propia).

En definitiva, a partir del proceso de búsqueda, revisión y evaluación del material bibliográfico, se logró recolectar un total de 67 trabajos para construir el estado del arte; identificar características, aplicaciones y capacidades para su posterior análisis en donde se exponen las posibilidades y tendencias de IoNT en diversos campos de bienestar social.

1.5. Resultados esperados

Como consecuencia de la investigación bibliográfica realizada respecto al estado del arte de IoNT, se esperan obtener los siguientes resultados:

- Difundir el término IoNT.
- Brindar las características, capacidades y posibilidades de IoNT para su utilización.
- Expresar ejemplos y tendencias a futuro de IoNT en diferentes campos de interés social.
- Exponer opciones de trabajos a futuro a través de IoNT.

CAPÍTULO II. Definiciones y características de IoNT

IoNT ha surgido principalmente a partir de las nuevas corrientes tecnológicas que se han presentado en los últimos años, originadas en la búsqueda de nuevos espacios de investigación y de las tecnologías emergentes para la producción de dispositivos *hardware* a escala.

La existencia de esta tecnología nace principalmente de antecedentes bastante próximos, y con la misma tendencia de la interconectividad entre dispositivos e internet, como es el caso de IoT e IoE.

Para comprender el concepto de IoNT, es preciso conocer las principales definiciones (Sección 2.1), entender cómo se comunican las nano-cosas (Sección 2.2), describir su arquitectura para el funcionamiento (Sección 2.3) y presentar los dominios de aplicación (Sección 2.4).

2.1. Propósito de IoNT

Para abordar el propósito de IoNT primero es necesario conocer las definiciones de los principales referentes del tema que se han analizado en este trabajo de investigación.

En conformidad con [10] el primer concepto de IoNT fue propuesto por Ian Akyildiz y Josep Jornet en un trabajo titulado “*The Internet of Nano-Things*” en el año 2010. El mismo indica lo siguiente:

La interconexión de dispositivos de nano-escala con las redes de comunicación existentes y, en última instancia, la Internet define un nuevo paradigma de redes que también se conoce como la Internet de Nano-Cosas.

Akyildiz &Jornet [5, p. 58]

Raul & Sarwade afirma que:

Esta es una red futurista donde los nano-objetos individuales realizan cálculos simples, comunicación, detección y actuación para llevar a cabo funciones intrincadas.

Raut & Sarwade [11, p. 1127]

Whitmore, Agarwal & Da Xu enuncia:

La Internet de Nano-Cosas puede ser descrita como la interconexión de dispositivos de nano-escala con redes de comunicación e Internet.

Whitmore, Agarwal & Da Xu [4, p. 266]

La definición de Bhargava, Ivanov & Donnelly, exterioriza lo siguiente:

Los avances simultáneos en nanotecnología e IoT han estimulado la evolución de un nuevo paradigma de redes, la Internet de las Nano-Cosas.

Bhargava, Ivanov & Donnelly [6, p. 1]

De manera semejante, [2] presenta a loNT como una extensión de IoT en el que incorpora nano-sensores en múltiples objetos en conjunto con el uso de nano-redes⁵.

En [12, p. 62] se dice que “*estos sensores en miniatura, interconectados a través de nano-redes, podrían obtener datos de grano fino dentro de objetos y de áreas difíciles de acceder, lo que conduciría al descubrimiento de nuevos conocimientos y aplicaciones*”.

Es decir, el propósito de loNT consiste en la capacidad interconectar diversos tipos de dispositivos desarrollados a nano-escala en una red de comunicaciones, en vista de que permita realizar recolección de datos en lugares de acceso complejo.

La Figura 3 ilustra el funcionamiento de las definiciones presentadas de loNT, mostrando la interconexión que se establece entre los diferentes dispositivos como lo son nano-sensores a través de nano-redes, con la finalidad de proporcionar información importante dentro de áreas de difícil acceso.

Por ejemplo: los nano-sensores en el cuerpo humano podrían suministrar señas vitales y los nano-sensores ambientales podrían recolectar información de patógenos y alérgenos. Estas fuentes de datos permitirían diagnosticar y monitorear con mayor precisión las condiciones en las que se encuentra un paciente [12].

⁵ El termino nano-redes hace referencia a la interconexión de dispositivos a nano-escala [13].

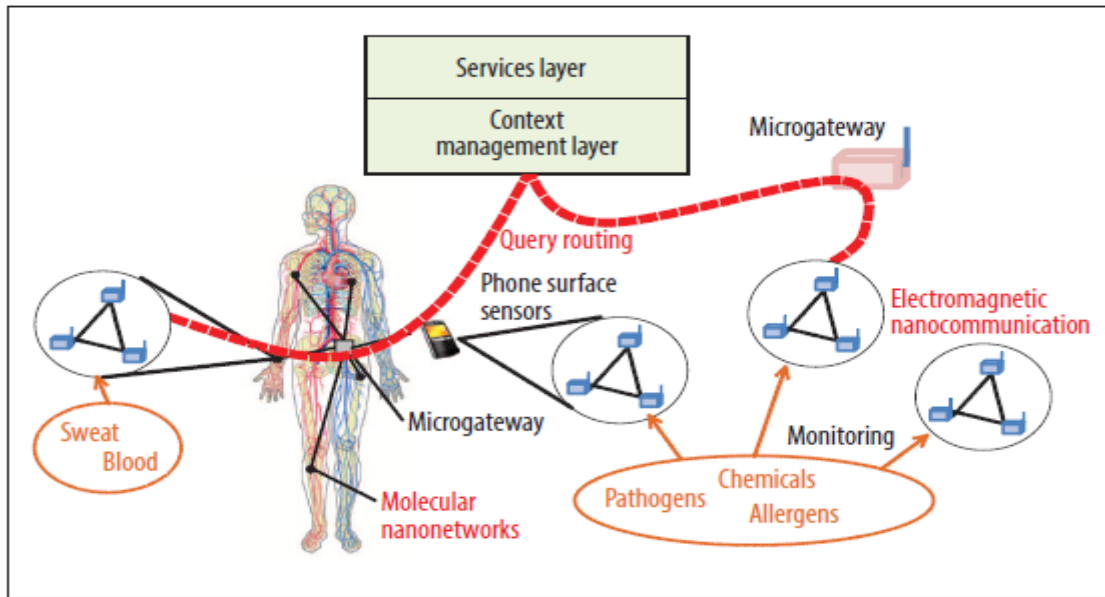


Figura 3. IoNT (recuperado de [12, p. 63]).

Independientemente de las áreas de aplicación, IoNT estipula la combinación a escala de nano-redes con objetos físicos para el intercambio de información, siendo esta parte fundamental en la comunicación y arquitectura de IoNT [10].

2.2. Nano-comunicación

En [13], para el 2008 las literaturas que hacían referencia al término de nano-redes figuraban como componentes electrónicos con la capacidad de interconexión dentro de un chip a nano-escala. Sin embargo, lo define de la siguiente forma:

Nano-redes no son una simple extensión de las redes de comunicación tradicionales a la nano-escala. Son un paradigma de comunicación completamente nuevo, en el que la mayoría de los procesos de comunicación se inspiran en los sistemas biológicos encontrados en la naturaleza.

Akyildiz, Brunetti & Blázquez [13, p. 2266]

Gregori & Akyildiz afirma que:

Las nano-redes, la interconexión de las nano-máquinas, ampliarán las capacidades de las nano-máquinas únicas proporcionándoles una forma de cooperar y compartir información.

Gregori & Akyildiz [14, p. 612]

De manera semejante, los autores [15][16] indican que la interconexión entre dispositivos a nano-escala amplía las capacidades de los nano-dispositivos para la elaboración de tareas complejas.

En la Figura 4 se muestran dos alternativas en las comunicaciones a nano-escala. Estas son la comunicación molecular y la comunicación nano-electromagnética [5]. Estas comunicaciones se detallan en las Secciones 2.2.1 y 2.2.2.

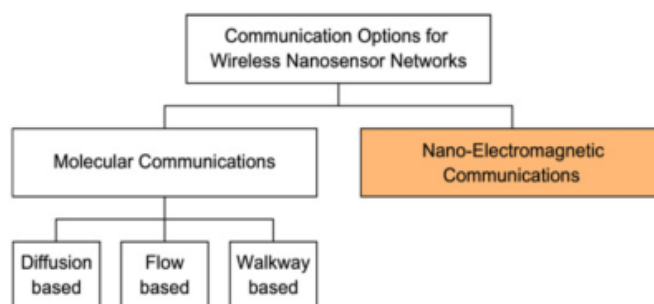


Figura 4. Nano-comunicación (recuperado de [17, p. 4]).

2.2.1. Comunicación molecular

La comunicación molecular es un nuevo enfoque para realizar comunicación entre nano-maquinas [14], está inspirada en los mecanismos de comunicación que ocurren entre las células vivas [18].

Para Akyildiz & Jornet la comunicación molecular:

Se define como la transmisión y recepción de información codificada en moléculas.

Akyildiz & Jornet [5, p. 58]

Además, Balasubramaniam & Kangasharju exponen lo siguiente:

Estas nano-redes pueden representar la información transmitida como datos almacenados dentro de un componente de ADN (similar a un paquete IP) o en forma binaria. El valor binario generalmente representa una concentración de moléculas que se transmiten entre los nodos. Por ejemplo, 1 representa una concentración específica, mientras que 0 representa ninguna transmisión molecular.

Balasubramaniam & Kangasharju [12, p. 64]

Así, por ejemplo, en [19] se propone una comunicación molecular a través de las feromonas⁶. Estas al ser liberadas proporcionan conductas determinadas entre miembros receptores de la misma especie. La propagación de estas feromonas depende del proceso de difusión molecular.

2.2.2. Nano-comunicación electromagnética

Al igual que en la comunicación molecular, los autores Akyildiz & Jornet indican que la nano-comunicación electromagnética:

Es definida como la transmisión y recepción de radiación electromagnética (EM) a partir de componentes basados en nuevos nano-materiales.

Akyildiz & Jornet [5, p. 58]

De igual modo, Lehtomäki manifiesta que:

La comunicación electromagnética (EM) ha sido sugerida como uno de los posibles enfoques para la comunicación entre nano-dispositivos. Algunos ejemplos de los enfoques de comunicación EM propuestos incluyen la comunicación en la banda de frecuencia muy alta (VHF) (30-300 MHz⁷) con receptores que utilizan nano-tubos⁸ de carbono mecánicamente oscilantes (radio de nano-tubos) y comunicación en la banda Terahertz⁹ (THz) (0,1-10 THz) con receptores que utilizan, por ejemplo: Antenas plasmónicas basadas en grafeno.

Lehtomäki [16, p. 1]

La banda Terahertz tiene como objetivo realizar la caracterización de la comunicación entre los nano-dispositivos, siendo una de las bandas de frecuencia existentes con las capacidades necesarias para el funcionamiento de las redes de nano-sensores [17]. En efecto, se considera la banda de *terahertz* como parte esencial para el entendimiento de redes a nano-escala en la nano-comunicación electromagnética [20].

⁶ “Las feromonas son moléculas de compuestos químicos liberados por plantas, insectos y otros animales” [18, p. 9]

⁷ *Megahertz* (MHZ) es la unidad de medida de frecuencia de una amplia gama de espectro electromagnético [60].

⁸ Estructuras tubulares con propiedades para ser conductores eléctricos a nano-escala [44].

⁹ *Terahertz* son ondas electrónicas, es una banda prometedora de mayor velocidad de transmisión de datos en comunicaciones inalámbricas [21].

Para [21][22] la banda de *terahertz* (0.1-10 THz) proporciona y soporta altas velocidades de transmisión, “*hasta unos terabits por segundo para distancias inferiores a un metro*”. [22, p. 88].

Por tal razón, como se indicará en párrafos posteriores, el diseño de nuevos nano-dispositivos como nano-transceptores y nano-antenas basadas en grafeno en combinación con la banda *terahertz* hace de una herramienta indispensable en las nano-comunicaciones.

2.3. Arquitectura de IoNT

Este nuevo paradigma de redes basado en la intercomunicación de nano-dispositivos, requiere de una serie de componentes para conformar un modelo de arquitectura de IoNT.

En la Figura 5 se presentan dos modelos de arquitectura de IoNT propuestos por [5]; del lado izquierdo de la figura las nanotecnologías intracorporales para aplicaciones sanitarias y del lado derecho la arquitectura para oficinas interconectadas.

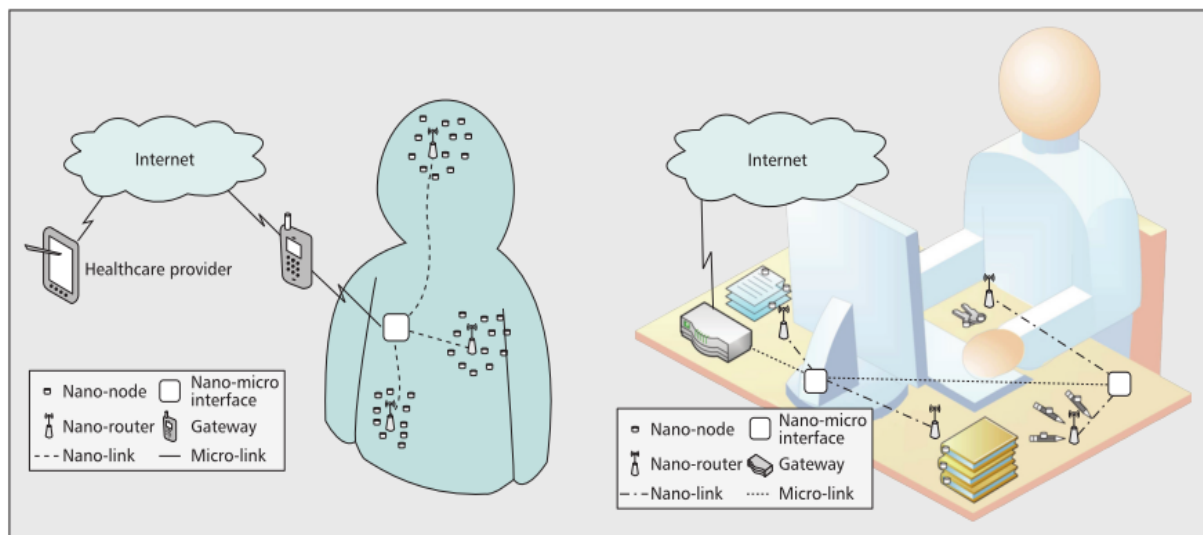


Figura 5. Arquitecturas de red para IoNT (recuperado de [5, p. 59]).

Habría que decir también que además de la descripción gráfica que presenta la Figura 5 en cuanto a las arquitecturas, la descripción de cada uno de los componentes que conforman la arquitectura de la red, esto independientemente del tipo de aplicación.

2.3.1. Arquitectura de red

Los componentes de las arquitecturas de red que se observan en la Figura 5 son los mismos tanto para aplicaciones sanitarias como para oficinas, entre ellas se destacan: *Nano-node*, *Nano-router*, *Nano-micro interface* y *Gateway*.

En [5][10][23] los autores expresan que los componentes *Nano-node*, *Nano-router*, *Nano-micro interface* y *Gateways* son parte de la arquitectura de loNT independientemente del tipo de aplicación y los describe de la siguiente forma:

- a) **Nano-Nodes.** Se consideran como las nano-maquinas más pequeñas y simples, capaces de realizar tareas de cómputo y transmisión de datos [10]. Por tanto, los nano-sensores biológicos dentro de los cuerpos humanos y las nano-maquinas integradas a diversas cosas, como lo pueden ser; libros, llaves o carpetas de papel son ejemplos de *nano-nodes* [5].
- b) **Nano-Routers.** Contienen un gran poder computacional y funcionan como agregadores de información que proviene de los *nano-nodes* [23]. Los *nano-routers* tienen la capacidad de controlar el comportamiento de *nano-nodes* a través del intercambio de comandos de control muy simples (*on / off, sleep, read value*, etc.)[5].
- c) **Nano-Micro Interface devices.** Funcionan como dispositivos híbridos para comunicarse a nano-escala que pueden utilizar tanto las técnicas de nano-comunicación como las redes de comunicación tradicional [10]. Estos dispositivos gozan de la capacidad de agregar la información que proviene de los *nano-routers* para transmitirla a micro escala, y viceversa[5].
- d) **Gateway.** Permiten gestionar el control de la red de nano-cosas por medio de Internet [23]. Por ejemplo, en una red intracorporal un *smartphone* puede enviar la información que recibe de una *nano-micro interface* colocada en nuestra muñeca a un médico [5].

2.3.2. Arquitectura de nano-máquinas

Una nano-máquina se define como un dispositivo mecánico compuesto por diferentes elementos a nano-escala [10]. Las tareas que realizan estas nano-máquinas pueden resultar muy sencillas debido a su tamaño, como la detección o actuación [14][19].

Los siguientes son componentes que conforman una nano-máquina:

- a) **Control Unit.** Radica en ejecutar cada una de las instrucciones para la elaboración de las tareas previstas, y controlar los demás componentes de la nano-maquina [13]. [23] señala que esta unidad de control se encarga de gestionar todas las demás partes que componen a las nano-máquinas.

- b) *Communication Unit.*** Consiste en un transceptor [3] con la capacidad de funcionar como emisor y receptor de mensajes a nivel nano [13].
- c) *Reproduction Unit.*** Realiza la creación de los componentes de las nano-maquinas a partir de elementos externos, ensamblando cada uno de ellos de forma efectiva para la fabricación de la nano-maquina [10].
- d) *Power Unit.*** Permite suministrar la energía [3]. Recolecta la energía de fuentes externas, por ejemplo, la temperatura y la luz, y alimenta a partir de ellos todos los componentes de la nano-máquina [23].

2.4. Dominios de IoNT

IoNT contiene dos nuevos dominios: Internet de las Nano-Cosas Multimedia e Internet de las Bio-Nano Cosas [24], además, la arquitectura de los nano dispositivos puede llegar a ser diferente, dependiendo de las capacidades que brinda nanotecnología.

2.4.1. Internet de las Nano-Cosas Multimedia (IoMNT)

Al igual que en la definición del concepto de IoNT, Jornet & Akyildiz definen a IoMNT como:

La interconexión de los nano-dispositivos multimedia con las redes de comunicación existentes y, en última instancia, la Internet define un paradigma de comunicación novedoso que también se conoce como Internet de Nano-Cosas Multimedia (IoMNT).

Jornet & Akyildiz [25, p. 242]

En [25], la visión o perspectiva de las nano-cosas multimedia concluye que los nano-componentes tienen que ser integrados en un único dispositivo. Como se puede observar en la Figura 6, un único dispositivo está conformado por diferentes nano-componentes (*nano-cameras, nano-phones, nano-antenna, etc.*), además este dispositivo debe ser sumamente pequeño de al menos unos pocos micrómetros cúbicos [17][22].

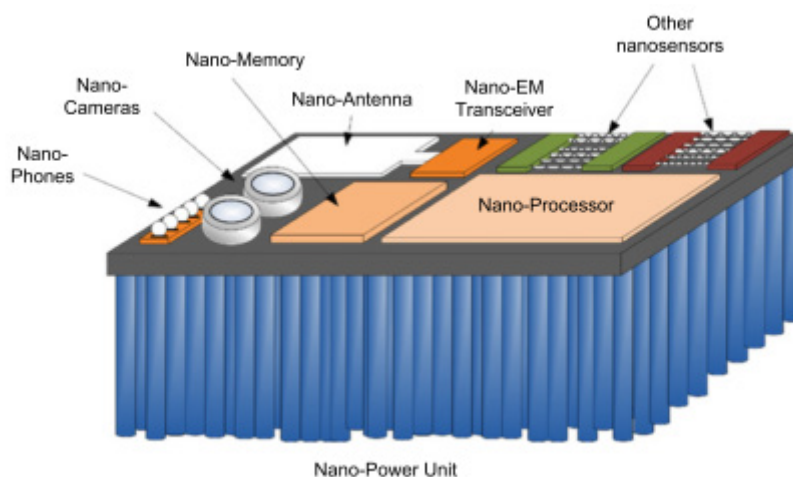


Figura 6. Arquitectura multimedia nano-cosa (recuperado de [25, p. 244])

A continuación se detallan los componentes mostrados en la Figura 6:

a) **Nano-Cameras.** foto-detector diseñada a nano-escala el cual es de gran importancia en las telecomunicaciones. Permite la detección de señales y captación de imágenes ópticas [15].

Entre sus características se destacan:

- Tamaño muy pequeño (por debajo de 100 nanómetros¹⁰ (nm) por píxel, lo que permite la integración de matrices muy densas).
- Muy alta sensibilidad a bajos niveles de energía (es decir, mejores condiciones de baja luminosidad).
- *Muy bajo consumo de energía.* [25, p. 244].

b) **Nano-Phones.** Consisten en transductores ultrasónicos con dimensiones a nano-escala [26]. Los mismos permitirían desarrollar micrófonos a nano-escala con las siguientes características:

- Mayor resolución direccional (detección y grabación de audio envolvente).
- *Mejor resolución de frecuencia (audio de mayor calidad, grabación ultrasónica).* [25, p. 244].

c) **Scalar nanosensors.** Son dispositivos competentes de una nueva generación de sensores [27]. Utilizan propiedades de nano-materiales con el objetivo de identificar y

¹⁰Un nanómetro (nm) es una milésima parte de un micrómetro (μm), un millonésimo de milímetro (milímetro) y mil millones de metros (m)[35].

medir eventos en nano-escala, tal como las características físicas en compuestos químicos, virus, bacterias e inclusive en células cancerosas [25].

- d) **Nano-Processor.** Transistores de alto rendimiento[28]. Son más pequeños y tienen la capacidad de trabajar en frecuencias altas. No obstante, la capacidad de procesamiento de un nano-procesador depende del número de transistores que contiene el chip [8].
- e) **Nano-Memories.** En [25] se indica que estas memorias aún no se encuentran listas y disponibles para los nano-dispositivos. Se consideran a los nano-materiales y los nuevos procesos de fabricación como punto de inicio para su desarrollo, por medio de memorias de átomo único, donde cada bit de información requiere de solo un átomo.

Considerando el tamaño que disponen estas tecnologías, es poco probable que una nano-cosa tenga la capacidad de almacenar más de un paquete de datos a la vez [8].

- f) **Power Nano-systems.** Este tipo de baterías requieren nuevos modelos o técnicas que permitan almacenar la energía de modo muy diferente al tipo de baterías convencionales. Existe una técnica estudiada basada en el efecto piezoeléctrico, donde se convierte la energía vibracional en electricidad [25].

Consiste en un modelo de energía analítica el cual a partir de un nano-generador piezoeléctrico se puede desarrollar de igual manera el proceso de recolección y consumo de energía [29].

- g) **Nano-Antennas y Nano-Transceivers.** El uso de los nano-materiales ha generado que se puedan realizarse muchas investigaciones y con ello la posibilidad de fabricación de nano-antenas. Estas antenas son mucho más compactas que las antenas clásicas, se basan en grafeno y tienen la posibilidad de trabajar en la frecuencia de la banda de *Terahertz* [30].

Las capacidades de multimedia, procesamiento, almacenamiento de datos, energía, etc., de los nanos-dispositivos no siempre serán las mismas, estas capacidades varían conforme a su tamaño [25].

2.4.1. Internet de las Bio-Nano Cosas (IoBNT)

La definición de IoBNT es provista por Akyildiz, Pierobon, Balasubramaniam & Koucheryavy:

Dentro del alcance del IoBNT, Bio-Nano Cosas se define como unidades estructurales y funcionales básicas que operan e interactúan dentro del ambiente biológico. Se espera que Bio-Nano Cosas, a partir de células biológicas, y habilitada por la biología sintética y la nanotecnología, realice tareas y funcionalidades típicas de los dispositivos informáticos integrados en el IoT, tales como la detección, procesamiento, actuación e interacción entre sí.

Akyildiz, Pierobon, Balasubramaniam et al. [3, p. 33]

El dominio de IoBNT tiene la perspectiva sobre estructuras biológicas. Principalmente se basa en las células biológicas como parte de esas sub estructuras de las bio-nano cosas.

En la Figura 7 se observa cómo se lleva a cabo la comparación de elementos por parte de una célula biológica con los elementos o componentes que conforman un dispositivo electrónico. Por ejemplo, el núcleo de la célula con la unidad de control y el citoplasma con la memoria.

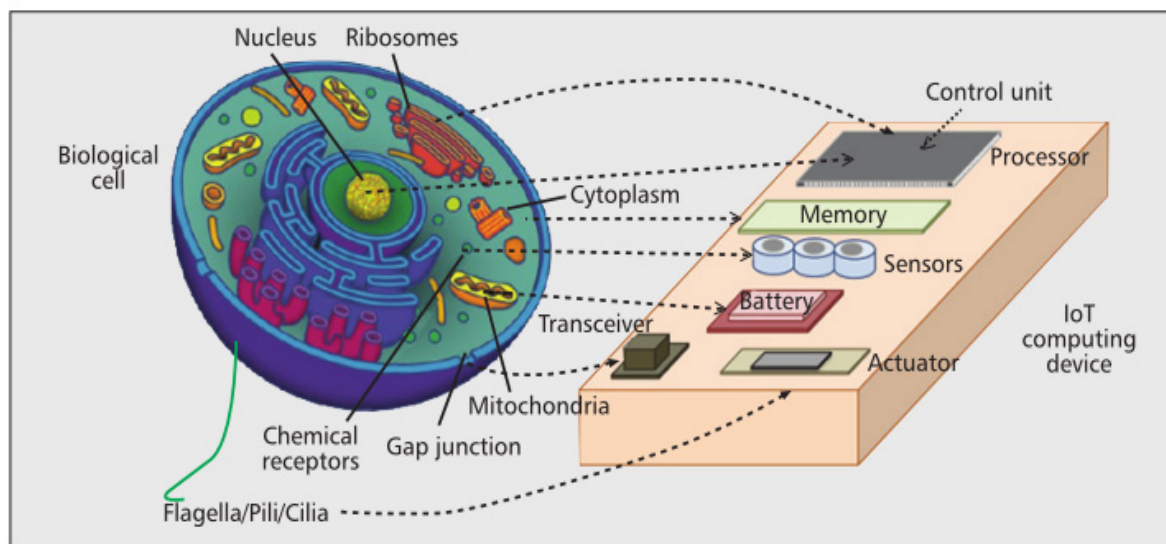


Figura 7. Elementos de una célula biológica y componentes de IoT (recuperado de [3, p. 33]).

A continuación se describirán algunas particularidades de la arquitectura de IoBNT en comparación con la arquitectura clásica de IoNT presentada en la Sección 2.3.2.

[13] y [3] describen elementos de arquitectura de loBNT de la siguiente forma:

- a) Control Unit.** Considerado como el núcleo de la célula [13]. Las instrucciones genéticas son las que se encuentran empaquetadas en las moléculas de ADN de las células [3].
- b) Memory Unit.** Corresponde al contenido químico del citoplasma, el cual se encuentra en el interior de la célula y está conformada por moléculas sintetizadas de la célula [3].
- c) Processing Unit.** Conciérne a la maquinaria molecular que a través de moléculas de ADN genera otras moléculas con tipos y concentraciones dependientes de las instrucción dadas [3].
- d) Power Unit.** Corresponde al depósito en la célula de la molécula Trisfosfato de Adenosina (ATP), la cual brinda energía para que se pueda llevar a cabo las reacciones bioquímicas de la célula [3].
- e) Transceivers.** Recae sobre las cadenas de reacciones químicas, a través de estas las células intercambian moléculas de información [3].
- f) Sensing and actuation.** Conciérne a la capacidad de la célula para reconocer moléculas externas o estímulos físicos [3].

CAPÍTULO III. Capacidades y posibilidades de IoNT

Este capítulo realiza un recorrido por las principales posibilidades y capacidades de IoNT, entre ellas la nanotecnología; responsable directa de los sistemas IoNT.

La nanotecnología constituye la ingeniería con las capacidades de manipular materia a escalas nano-métricas. Con ella se amplían las capacidades de aplicación en diferentes áreas y en fusión con nano-redes se dan los sistemas de IoNT.

Se brindan detalles en cuanto al estado actual de IoNT en relación con la seguridad y protocolos de las nano-redes. Estos temas son primordiales para el establecimiento y la confianza del funcionamiento de los sistemas IoNT.

Existen grandes expectativas en el futuro de IoNT, por ello se recitan ideas basadas en soluciones disponibles actuales como lo son IoT y las posibilidades de realizar ajustes o implementar nuevas soluciones para contrarrestar las amenazas en los sistemas de IoNT.

3.1. Nanotecnología

El concepto de nanotecnología fue propuesto por primera vez en el año 1974, en un trabajo en el que se explicaba que la nanotecnología radicaba en el procesamiento, separación, consolidación, etc., de materiales por un átomo [22].

En [31] se exterioriza que la nanotecnología comienza a tener una mayor influencia en el ámbito científico para el año 2007, no solo catalogada como un importante avance tecnológico, sino también llegar a ser considerada como el primer avance más importante del tercer milenio [32].

El autor [10, p. 4] define el concepto más básico de la nanotecnología como “[...] *la ingeniería de los sistemas funcionales a escala molecular*”. Tiene la capacidad de manipular materia en escalas muy pequeñas o escala manométrica [33][34].

Para comprender mejor, a continuación se muestran otras definiciones de nanotecnología:

El término "nanotecnología" no describe una tecnología singular, sino que abarca una gama de tecnologías que operan a la escala de los bloques de construcción de materiales biológicos y manufacturados a "nano-escala".

Miller & Senjen [35, p. 4]

La definición de Bawa, Bawa, Maebius et al. indica:

El diseño, caracterización, producción y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas por manipulación controlada de tamaño y forma a escala nano-métrica (escala atómica, molecular y macromolecular) que produce estructuras, dispositivos y sistemas con al menos una novedad / característica o propiedad superior.

Bawa, Bawa, Maebius et al. [36, p. 151]

Hornig manifiesta:

La nanotecnología es una clase o grupo de tecnologías habilitadas por los avances en microscopía y desarrollos relacionados en ingeniería que nos permiten visualizar y manipular la materia en esta escala extremadamente pequeña. No es una tecnología particular sino un conjunto de tecnologías habilitadas por un conjunto particular de capacidades tecnológicas (ingeniería) y que se distinguen por su explotación de las propiedades de ciertos materiales a "nano-escala", que pueden ser diferentes de sus propiedades en su forma natural.

Hornig [37, p. 21]

Con las capacidades de la nanotecnología para la manipulación y modificación de materiales a escala manométrica, [17] destaca que el objetivo principal de la nanotecnología es la creación de nuevos dispositivos a nano-escala, con particularidades que derivan de la nanotecnología como únicas.

Un ejemplo de ello son los nano-sensores (químicos o biológicos) los cuales han sido una de las primeras aplicaciones por parte de las nanotecnologías, esto a partir de estructuras (nano-partículas¹¹, nano-tubos, *nanorods*¹², etc.) que pueden llegar a ser inferiores a los 100 nanómetros [38][39][40].

Un estudio publicado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva del gobierno de Argentina [41] señala que la nanotecnología tendrá una atribución importante

¹¹ Las nano-partículas son racimos de unos pocos cientos a unos pocos miles de átomos y tienen propiedades ópticas dependientes del tamaño que se han utilizado para construir nano-sensores ópticos[40].

¹² "Partículas que son capaces de propulsarse a sí mismas ya pequeños objetos, por medio de gradientes autogenerados que se producen catalizando la energía química libre presente en el ambiente". [14, p. 616]

sobre los productos y servicios a nivel mundial, principalmente en los siguientes campos nanotecnológicos: Nano-biotecnología, Nano-analítica, Nano-materiales, Nano óptica, Nano electrónica y Nano química.

En la Tabla 2, se detallan los campos tecnológicos y su descripción a partir de la atribución de la nanotecnología sobre los productos y servicios expuestos en [41].

Tabla 2. Campos tecnológicos.

Campo nanotecnológico	Descripción
Nano-biotecnología	Se denomina nano-biotecnología a la convergencia entre la nanotecnología y la biología molecular [42].
Nano-analítica	La combinación de técnicas microscópicas clásicas con modernas para observar materiales y obtener información sobre composiciones químicas de materiales a escala atómica [41].
Nano-materiales	Los nano-materiales es aquella tecnología que ha sido definida con una o más dimensiones y que miden 100 o menos nanómetros, o que a esta escala afecta las propiedades de los materiales [34].
Nano óptica	Nano-estructuras que pueden ser utilizados para mejorar los procesos de extracción de luz o el acoplamiento de diodos que son emisores de luz [43].
Nano electrónica	Se basa en la innovación y el alto desempeño de tecnologías semiconductoras a nano-escala [41][44].
Nano química	Consiste en la producción innovadora de materiales a nano-escala [41].

Estos campos tecnológicos abarcan todas aquellas tecnologías que tienen que ver con la salud, TIC, energía, etc., y que poseen como objetivo unos de los propósitos de IoNT, especialmente en llegar a obtener datos de grano fino, ya sea de objetos o de lugares con difícil acceso, tal y como se mencionó en el Capítulo I.

En pocas palabras las nanotecnologías son nuevas, se están expandiendo a grandes velocidades [32][45], y transformarán los productos y servicios principales del mundo. Para [46, p. 62] “en un lapso de entre 10 y 20 años, una parte significativa de la producción industrial, la atención médica y la interacción con el medio ambiente cambiarán debido a la utilización de las nuevas tecnologías”. De modo que las posibilidades y capacidades de IoNT aumentarán, debido a su dependencia de la nanotecnología.

3.2. Seguridad en las nano-cosas

IoNT se encuentra vulnerable a todo tipo de ataques, ya sean físicos o por medio de las tecnologías inalámbricas [25][47][48][49], dado que este tipo de dispositivos no se encuentran con una constante vigilancia.

Los ataques pueden producirse para adquirir datos privados a través del robo de sensores, interrumpir aplicaciones controladas por medio de ordenadores o modificar los enlaces de comunicación en las nano-redes.

En [25][50] se plantea la existencia de tres dimensiones por investigar con el fin de encontrar una mayor seguridad y privacidad en IoNT. Estas dimensiones consideran: nuevos mecanismos para autenticación, para garantizar la integridad de los datos y para garantizar la privacidad del usuario.

Por su parte, [47] indica la existencia de nuevos métodos de seguridad entre las nano-comunicaciones, sobre todo la conexiones entre IoNT e IoT. Estos aspectos de seguridad mencionados son: seguridad en nano-comunicación, objetivos de seguridad y mecanismos de seguridad para sistemas IoNT.

3.2.1. Seguridad en nano-comunicaciones

En una primera instancia, es importante señalar que todos los métodos o técnicas de seguridad existentes para las redes de comunicaciones tradicionales no son aplicables en su totalidad para las nano-comunicaciones. En vista de que los dispositivos utilizados para establecer la comunicación están sujetos a determinadas capacidades debido a sus tamaños.

Uno de los principales temas en este campo de la seguridad de la nano-comunicación es la criptografía, con grandes problemas en la gestión de claves [51][52]. En [47] recalcan que los algoritmos estándares de criptografía como es el caso de AES[53] y RSA[54], no son adaptables o aplicables en las nano-comunicaciones dado que la capacidad computacional de los nano-sensores es baja [25].

3.2.2. Objetivos de seguridad

Los objetivos de seguridad[55] son una serie de conceptos que permiten garantizarla seguridad de los sistemas de comunicación. Se componen de la confidencialidad, integridad y disponibilidad, y son llamados CIA (*confidentiality, integrity, availability*) por sus siglas en inglés.

Estos objetivos CIA no cambian cuando pasamos de la seguridad de las redes de comunicación tradicionales a la seguridad de las nano-redes de comunicación [47]. Para garantizar los sistemas de nano-comunicación ante un ataque, se debe asegurar los objetivos de la siguiente forma:

- a) **Confidencialidad.** *“Un atacante no debe poder aprender el contenido de un mensaje intercambiado entre un remitente y un receptor”.* [55, p. 153].
- b) **Integridad.** *“Un atacante no debe ser capaz de modificar el contenido de un mensaje intercambiado entre un remitente y un receptor”.* [55, p. 153].
- c) **Disponibilidad.** Asegura que todos los servicios de red siempre estén disponibles, independientemente de la presencia de ataques (denegación de servicios, inanición de energía, etc.) [51]. Es decir, *“un atacante no debe ser capaz de interrumpir o afectar negativamente a la comunicación”.* [55, p. 153].

Teniendo como base los objetivos de seguridad CIA y la información recolectada se identifican otro tipo de amenazas que ponen en riesgo los sistemas loNT. Las mismas se muestran clasificadas por grupo en la Tabla 3.

Tabla 3. Amenazas y ataques contra sistemas loNT.

Grupos	Amenazas
Divulgación	<ul style="list-style-type: none"> • Evento donde una entidad consigue acceso a datos para los cuales no está autorizada [56]. • Ataque de espionaje que se realiza en los canales de comunicaciones inalámbricos [47].
Engaño	<ul style="list-style-type: none"> • Evento donde una entidad autorizada recibe datos falsos y cree que son verdaderos [56]. • Ataques de falsificación o enmascaramiento [55].
Interrupción	<ul style="list-style-type: none"> • Eventos que impiden el correcto funcionamiento de los servicios del sistema [56]. • Valorar el control físico y los accesos que podría tener un atacante en el nano-sistema, con el objetivo de evaluar los riesgos de ataque [55].
Usurpación	<ul style="list-style-type: none"> • Evento en donde una entidad autorizada toma el control de los servicios de los nano-sistemas [56]. • Además de darte la interrupción, el atacante toma control total de el nano-sistema [55].

3.2.3. Mecanismos de seguridad para los sistemas de IoNT

Para asegurar los objetivos de seguridad CIA, y con ello ampliar las posibles soluciones de seguridad en IoNT, se deben considerar estrictamente los siguientes mecanismos con el fin de establecer comunicaciones seguras en redes de nano-sensores.

- a) Gestión de claves.** *“El establecimiento de claves simétricas se denomina gestión de claves”.* [57, p. 1]. En redes de sensores inalámbricas / *Wireless Sensor Networks* (WSN) se considera la criptografía de claves simétricas, principalmente por las bajas potencias en las baterías de estos nodos [58].

En todos los esquemas de gestión de claves siempre se tiene como base la distribución de claves [59]. Esta distribución de claves se puede realizar por medio de pre-distribución o pro-activo en una red de sensores antes de establecer la comunicación de datos [48].

Independientemente del tipo de distribución de claves (pre-distribución o pro-activo) que se utilice, en redes de nano-sensores los problemas de criptografía persisten. El principal problema es que estos nodos tienen una memoria limitada, lo que hace muy difícil que estos amanecen la información de las claves [58].

El reto de seguridad en la gestión de claves de redes de nano-sensores se basa en cómo establecer las claves compartidas y de qué manera pueden ser revocadas en caso de ser necesario [55].

- b) Rendimiento y escalabilidad.** La seguridad y privacidad en los sistemas de nano-comunicación presentan grandes desafíos entorno al rendimiento y la escalabilidad de los nodos participantes [48].

La razón sigue siendo la misma; los recursos y las capacidades computacionales que tienen estos nodos. Los consumos de energía son aspectos críticos y muchos sistemas de comunicación planteados se basan en radios de nano-tubos, los cuales tienen un alto consumo de energía [60].

Debido a los bajos recursos de las nano-redes, es importante reconsiderar protocolos de comunicación y algoritmos criptográficos para poder ser aplicados en este tipo de redes [55], principalmente para proporcionar soluciones escalables con la integración de “n” cantidad de nano-nodos y que el rendimiento sea el mejor posible.

- c) **Control de acceso y autenticación.** La autenticación es un requisito previo para garantizar el objetivo de la confidencialidad [47]. Cada uno de los mensajes que quieran ser enviados a un sistema de nano-comunicación debe pasar por una puerta de enlace y, ser autenticado.

Es importante mencionar que los sistemas de nano-comunicación no tienen un fácil acceso a las complejas arquitecturas tradicionales. Se deben analizar las cargas computacionales de las primitivas criptográficas y lo que esto requiere para la comunicación de los enlaces [55]. Un ejemplo de ello son los *unicast* y *broadcast*.

- d) **Localización segura.** En IoNT muchas de sus aplicaciones van a necesitar conocer la localización de los nano-sensores para realizar trabajos específicos [55].

La localización podría ser una opción para la seguridad, principalmente en la autenticación. Donde la proximidad de nano-sensores de forma física formaría parte de la autenticación [61]. Por ejemplo, *“permitiendo que sólo las nano-máquinas cercanas se comuniquen, evitando que los atacantes más distantes interfieran”*. [48, p. 6186].

- e) **Detección de intrusos.** Debido a los problemas planteados por parte de los métodos clásicos de criptografía presentados en apartados anteriores, es importante realizar las gestiones pertinentes para detectar y reaccionar ante de los ataques.

Uno de los ataques más comunes podría ser la denegación de servicios, interfiriendo e inundando las comunicaciones.

En [55] se indica que una estrategia para contrarrestar un ataque de denegación de servicios. El mismo consiste en implementar un sistema de detección de intrusos en el nodo de entrada al sistema de nano-comunicación y que sea a prueba de fallas.

3.3. Protocolos de nano-redes

Los dispositivos a nano-escala se caracterizan por tener particularidades únicas brindadas por la nanotecnología. También presentan una serie de inconvenientes en cuanto a la comunicación, principalmente para establecer una conexión de red de múltiples nano-dispositivos.

En la Tabla 4, se presentan ideas preliminares para la creación de conexiones de red de varios dispositivos a nano-escala elaboradas a partir de información recolectada en [5].

Tabla 4. Ideas para protocolos de nano-redes.

Idea	Descripción
Canales compartidos	Desarrollar comunicaciones basadas en impulsos [62]. Principalmente en protocolos de Control de Accesos a Medios (MAC) asíncronos, donde un nano-nodo esté preparado para enviar un paquete, transmitirlo y solamente esperar algún tipo de acuse de recibido [5].
Direccionamiento de nano-maquinas	Implementar esquemas de direccionamiento que capturen y exploten la jerarquía de la red. Explorar aplicaciones específicas donde no es necesario obtener información de una nano-cosa específica, sino sólo de cualquier nano-cosa de un tipo específico. Investigar estrategias para el descubrimiento de vecinos que exploten la alta directividad de las antenas <i>terahertz</i> para determinar simultáneamente la ubicación y orientación relativas entre los nano-objetos [25].
Enrutamiento de información	Se debe definir un sistema de comunicación basado en impulsos, y suponer que los nano-nodos conocen la distancia entre ellos. <i>Por ejemplo, "los diferentes nodos a la misma distancia del nano-router tendrán el mismo ID. Los vecinos de estos nodos, que podrían no haber oído el nano-router, simplemente tomarán una ID más alta y la difundirán. Por consiguiente, otros nodos tendrán ID más altos". [5, p. 62]</i> Muy similar a lo que se realizan en sistemas IR-UWB [63].
Cuestiones de Confiabilidad	Debe existir una confiabilidad garantizada extremo a extremo para todos los mensajes que van desde un centro de mando hasta cada uno de los nano-nodos [5].
Asociación de Redes y Descubrimiento de Servicios	Se necesitan nuevas soluciones para la asociación de redes y descubrimiento de redes [5][3]. Con una estructura jerárquica de red no es necesario notificar a toda la red la existencia de un nuevo nano-nodo, solo sería necesario notificar al <i>nano-router</i> o <i>nano-micro interface</i> más cercano [5].

3.5. Aplicaciones de Internet de las nano-cosas

Las posibilidades que brindan las nuevas técnicas para la recolección de información de grano fino [64] por parte de IoNT permiten aumentar las aplicaciones existentes e incursionar en nuevos campos en contraste con IoT.

En la Figura 8, se pueden observar las diferentes aplicaciones de IoNT que fueron analizadas y clasificadas como resultado de la investigación realizada.

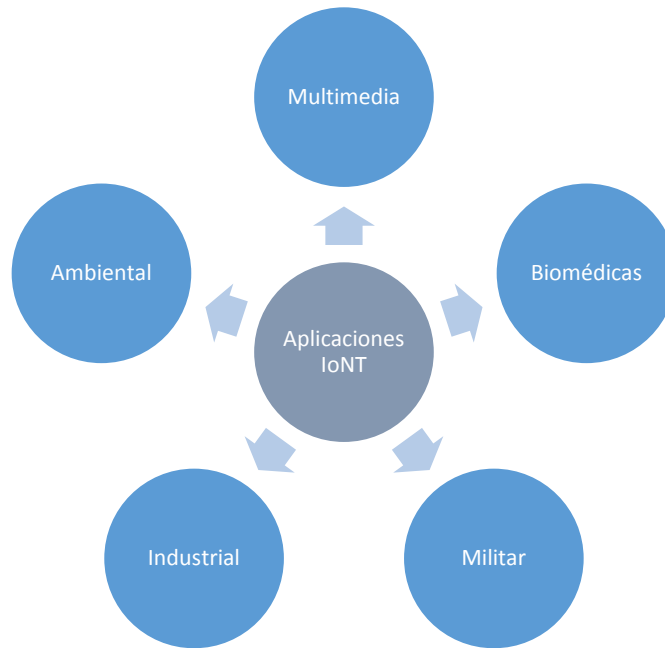


Figura 8. Aplicaciones de IoNT (figura de elaboración propia).

- a) Multimedia.** Se enfoca en la construcción de dispositivos como son los foto-detectores[15][65] y nano-transductores acústicos[26][66] para la producción de contenido multimedia con altas resoluciones y precisión en comparación a los dispositivos actuales [24].

Los sistemas nano-multimedia tienen su enfoque en diversos campos en los que podría ser de gran utilidad tales como vigilancia de salud, ataques biológicos, ciencia forense y control de procesos industriales [25].

- b) Biomédicas.** El uso de nano-sensores con la capacidad de entregar algún tipo de medicamento en alguna parte específica del cuerpo humano. Permiten a los médicos controlar y monitorear de forma remota los nano-sensores para la recolección de información [12][24]. Ejemplos de estos nano-sensores pueden ser el monitoreo de salud intracorporal y el suministro de fármacos [22].

- c) Militares.** En el campo militar, IoNT surge con la capacidad de detectar la presencia de compuestos químicos a través de los nano-sensores [24].

La extensión de las nano-redes en este campo pueden ser de variados tamaños, por ejemplo, en un campo de batalla la exigencia de una interconexión de nano-redes es densa [13], mientras que el monitoreo del estado de salud de los soldados por medio de nano-sensores corporales el área es mucho más pequeña [67].

- d) Industrial.** En este dominio, IoNT podría colaborar con el desarrollo de materiales, mejorar los procesos de fabricación y los procedimientos de control de calidad de muchas empresas u organizaciones [13].

Una de las tendencias por parte de la nanotecnología se basa en la tecnología táctil. Por tanto, IoNT se podría aplicar para impulsar la sensibilidad del tacto en superficies de aire por medio de nano-sensores que detecten los movimientos y los conviertan en señales [24].

- e) Ambientales.** Con la diversidad de nano-sensores químicos y biológicos, existe la posibilidad de realizar monitoreo y estudios de compuestos químicos que liberan e intercambian las plantas [24].

Con las aplicaciones de las nano-redes presentadas en [13], se elabora la Tabla 5. Esta tabla reúne una serie de propuestas por cada uno de los campos o dominios para aplicación de IoNT:

Tabla 5. Campos y aplicaciones de IoNT.

Campo o dominio	Propuestas de aplicación
Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Biodegradación • Animales y control de la biodiversidad • Control de la contaminación del aire
Biomédicas	<ul style="list-style-type: none"> • Soporte del sistema inmunológico • Implantes biohíbridos • Sistemas de administración de fármacos • Vigilancia de la salud • Ingeniería genética
Industrial	<ul style="list-style-type: none"> • Control de calidad de alimentos y agua. • Materiales y tejidos funcionalizados

Militares	<ul style="list-style-type: none"> • Defensas nucleares, biológicas y químicas • Equipos nano-funcionales
Multimedia	<ul style="list-style-type: none"> • Nano-cámaras • Nano-teléfonos

El paradigma de IoNT y su gran capacidad de aplicación en diferentes campos ha logrado transformar el día a día de las personas, impulsa la economía y sobre todo brinda la posibilidad de continuar investigando en diversas áreas [68]. La amplitud de las capacidades y posibilidades de IoNT en el mundo, indica que el mercado de IoNT tiene previsto una alta inversión económica, con un aproximado de \$ 9,69 mil millones para el año 2020 [23].

En la Tabla 6 se presentan ejemplos que sirven para brindar una idea o perspectiva de los trabajos que han realizado hasta el momento en IoNT:

Tabla 6. Ejemplos de IoNT.

Autor/es	Año	Título	Descripción
Bhargava, Ivanov & Donnelly	2015	<i>Internet of Nano Things for Dairy Farming</i>	<p>Es un trabajo que se encuentra en progreso y consiste en exponer el potencial de IoNT en la agricultura de precisión, específicamente la ganadería de lechera.</p> <p>Particularmente, se destaca la aplicación de redes nano-sensoriales en diferentes casos de uso como lo son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vigilancia del césped • Salud animal y gestión de alimentos • Supervisión de condiciones de campo • Reducción de la resistencia a los antibióticos
Dressler & Fischer.	2015	<i>Connecting in-body nano communication with body area networks: Challenges</i>	<p>Este trabajo ingresa en el campo biomédico y expone las oportunidades que presenta IoNT para conectar redes de área del cuerpo con nano-dispositivos en</p>

		<i>and opportunities of the Internet of Nano Things</i>	el cuerpo.
Afsharinejad, Davy.Jennings &Brennan.	2016	<i>Performance analysis of plant monitoring nanosensor networks at THz frequencies</i>	<p>Proponen un modelo simplificado de una estructura de una planta en conjunto con un modelo para la probabilidad de transmisiones exitosas entre los nano-sensores con otros dispositivos a nano-escala que se agregan a los tallos de la planta.</p> <p>Lo anterior como parte fundamental para la realización de sistemas de monitoreo de plantas.</p>
Jarmakiewicz, Parobczak & Maslanka,	2016	<i>On the Internet of Nano Things in healthcare network</i>	<p>El trabajo presenta un análisis de resultados de una red de nano-sensores que funcionan en el sistema circulatorio humano, como parte de la telemedicina. Principalmente, indica las características de las pérdidas de los mensajes enviados y los retrasos de entrega de la información en las nano-interfaces.</p>
Neethirajan	2017	<i>Recent advances in wearable sensors for animal health management</i>	<p>Consiste en un análisis de bio sensores nanos y técnicos para el diagnóstico de enfermedades infecciosas del ganado, promoviendo ventajas y desventajas en el ámbito de la salud animal.</p>

CAPÍTULO IV. Tendencias y desafíos de IoNT

El enfoque principal de IoNT consiste en obtener datos muy finos dentro de lugares y objetos complejos, tales como pueden ser el cuerpo humano, ambiente, agricultura, etc., utilizando nanotecnología en donde se permita interconectar diferentes dispositivos en una red comunicaciones.

En este capítulo se presentan las tendencias y desafíos elaborados en base al estudio bibliográfico realizado. El aporte de este trabajo define categorías y criterios para identificar y exponer el estado actual de IoNT.

4.1. Análisis de tendencias y desafíos de Internet de las nano-cosas

El análisis del estudio se subdividió en cuatro secciones: método de clasificación, definición de criterios, aplicación de criterios y, tendencias y desafíos, con el fin de clasificar la literatura y brindar detalles de IoNT de acuerdo a las categorías y criterios planteados.

4.1.1. Método de clasificación

Con base en los objetivos planteados y al contenido de la literatura estudiada se establecieron criterios que son agrupados en tres categorías principales: tecnologías, aplicaciones y desafíos.

- a) **Tecnologías.** Los criterios que se agruparon en esta categoría permiten demostrar la esencia de IoNT. Dar a conocer las principales tecnologías que se están utilizando para el establecimiento y desarrollo de sistemas IoNT.
- b) **Aplicaciones.** En esta categoría se incluyen criterios que permiten demostrar las tendencias de las aplicaciones IoNT que se encuentran desarrolladas y por desarrollar en diversas áreas.
- c) **Desafíos.** Los criterios incluidos en esta categoría se encuentran vinculados con temas de mejora. Buscan identificar cuáles son las principales falencias en IoNT y los desafíos a los que se enfrentan los sistemas IoNT para mejorar sus funcionalidades y capacidades.

La Tabla 7 muestra la clasificación de los criterios por cada una de las categorías:

Tabla 7. Categorías y criterios de clasificación.

Categorías	Criterios
Tecnología	Hardware
	Software
	Arquitectura
Aplicaciones	Cuidado de la salud
	Industrial
	Ambiental
Desafíos	Seguridad
	Privacidad
	Comunicación

4.1.2. Definición de los criterios

A continuación se realiza la definición de cada uno de los criterios descritos en el apartado anterior:

a) Tecnologías. Cuando el paradigma y la visión de IoNT se establezcan por completo, las nano-cosas tendrán mayores capacidades y posibilidades que permitirán comprender e interactuar con las áreas de aplicación de mejor forma posible. Por consiguiente los sistemas de IoNT van a depender de una combinación de *hardware*, *software* y arquitecturas.

(i) Hardware. Con este criterio se identificarán aquellos dispositivos físicos actuales que son necesarios y básicos para el establecimiento de un sistema IoNT. Los valores posibles para este criterio se encuentran:

- Nano-sensors
- Nano-routers
- Nano-cameras
- Nano-phones
- Nano-processors
- Nano-memory
- Power Nano-Systems
- Nano-transceivers
- Bio-sensores

(ii) Software. Este criterio se enfoca en exponer el *software* para crear la interoperabilidad y el manejo de los datos entre los diferentes nano dispositivos. El posible valor para este criterio es:

- Middleware

(iii) Arquitectura. Las arquitecturas son indispensables cuando se habla de un sistema informático, son requeridas para la representación y organización, permitiendo que los sistemas funcionen de la mejor forma. El siguiente es un posible valor para este criterio.

- Arquitectura de *hardware/red*

b) Aplicaciones. En cuanto a las aplicaciones se ha mostrado en apartados anteriores la variedad de áreas de aplicación de IoNT. Este trabajo propone agrupar dichas áreas de aplicación en: cuidado de la salud, ambiente e industria como las más influyentes y recientes en el uso de sistemas IoNT.

(i) Cuidado de la salud. La reducción de tamaño de los sensores se convierte una opción viable para mejorar la calidad de vida de las personas y ser fundamentales como un apoyo para las propuestas actuales de telemedicina.

(ii) Ambiental. Los nano dispositivos permiten una serie de funcionalidades en donde es posible explorar situaciones de alta sensibilidad y químicos a partir de sistemas de monitoreo que no son posibles de realizar con las tecnologías convencionales.

(iii) Industrial. La integración de nano-sensores pueden generar grandes beneficios, reducir costos y requerimientos de mano de obra, además, mejorar la confiabilidad de los procesos.

c) Desafíos. Los desafíos a los que se enfrenta IoNT son diversos, tanto técnicos como sociales. Estos deben ser superados para lograr establecer la idea y la visión del paradigma de IoNT. Este trabajo propone clasificar los principales desafíos en: seguridad, privacidad y comunicación.

(i) Seguridad. Los nano dispositivos de IoNT suelen ser dispositivos inalámbricos y pueden estar ubicados en lugares de acceso al público. En consecuencia, la comunicación y conexión al mundo/Internet siempre está expuesta a diversos

problemas de seguridad. Es importante que estos dispositivos y comunicaciones sean lo medianamente posible seguras.

(ii) Privacidad. Con el pasar del tiempo cada vez más nano-dispositivos pueden llegar a ser localizados y controlados por medio de sistemas IoNT, y con ello las amenazas al acceso de datos privados aumenta. Se debe considerar el aseguramiento de los mismos y abordar problemas de propiedad intelectual para garantizar a los usuarios el uso y seguridad de los sistemas IoNT.

(iii) Comunicación. La comunicación es una fuente principal de todo sistema informático. En IoNT no es la excepción ya que se conduce a nuevos paradigmas de comunicación, principalmente porque estas se dividen en dos áreas: nano-comunicación electromagnética y comunicación molecular.

4.1.3. Aplicación de los criterios

A continuación se realiza la aplicación de criterios a las literaturas seleccionadas para el estudio. Es necesario destacar que se eligieron 26 publicaciones a partir de los resultados brindados por la aplicación de las preguntas de investigación [PI-2] o [PI-4] con respuesta “sí” (ver Anexo III) al total de publicaciones localizadas, debido a que estas proporcionan contenidos directos y referentes a características, posibilidades y desafíos de IoNT.

La Tabla 8 presenta las 26 publicaciones que se les aplicará los criterios que determinaran las tendencias (tecnologías y aplicaciones) y desafíos de IoNT.

Tabla 8. Lista publicaciones para la aplicación de criterios.

ID	Autor
D-1	El-din & Manjaiah [24]
D-2	Nayyar, Puri & Le [10]
D-3	Dabhi & Maheta [23]
D-8	Balasubramaniam, Jornet, Pierobon, et al. [68]
D-10	Akkari, Wang, Jornet, et al. [8]
D-11	Ali, Aleyadeh & Abu-Elkhair [7]
D-12	Jarmakiewicz, Parobczak & Maslanka [67]
D-17	Afsharinejad, Davy, Jennings [64]
D-18	Ali & Abu-Elkheir [62]
D-20	Dressler & Fischer [47]
D-21	Miraz, Ali, Excell [2]
D-22	Akyildiz, Pierobon, Balasubramaniam, et al. [3]
D-23	Bhargava, Ivanov & Donnelly [6]
D-27	Loscri, Marchal, Mitton et al. [49]
D-28	Balasubramaniam & Kangasharju [12]

D-29	Jornet & Akyildiz [30]
D-33	Dressler & Kargl [55]
D-35	Jornet & Akyildiz [50]
D-36	Jornet & Akyildiz [25]
D-41	Akyildiz, Jornet & Pierobon [22]
D-46	Akyildiz & Jornet [17]
D-47	Akyildiz & Jornet [5]
D-48	Gregori & Akyildiz [14]
D-51	Atakan & Akan [60]
D-53	Parcerisa & Akyildiz [19]
D-55	Akyildiz, Brunetti & Blázquez [13]

A continuación, en las siguientes sub-secciones se brinda el análisis de las literaturas por cada una de las categorías y sus respectivos criterios.

4.1.3.1 Tecnologías de IoNT

La categoría de tecnologías contiene los criterios que en su combinación dependen los sistemas de información de IoNT. La Tabla 9 muestra la aplicación de los criterios y con ello determinar el enfoque y las tendencias de las publicaciones seleccionadas, esto se establece a través de las respuestas “sí” o “no” que contiene cada publicación en cada criterio.

Tabla 9. Aplicación de criterios en la categoría de tecnologías de IoNT.

ID	Autor	Tecnología		
		Hardware	Software	Arquitectura
D-1	El-din & Manjaiah [24]	Si	No	Si
D-2	Nayyar, Puri & Le [10]	Si	No	Si
D-3	Dabhi & Maheta [23]	Si	No	Si
D-8	Balasubramaniam, et al. [68]	No	No	No
D-10	Akkari, et al. [8]	No	No	No
D-11	Ali, Aleyadeh & Abu-Elkhair [7]	No	No	Si
D-12	Jarmakiewicz, Parobczak & Maslanka [67]	No	No	Si
D-17	Afsharinejad, Davy, Jennings [64]	No	No	No
D-18	Ali & Abu-Elkheir [62]	Si	No	Si
D-20	Dressler & Fischer [47]	No	Si	Si
D-21	Miraz, Ali, Excell [2]	Si	No	No
D-22	Akyildiz, et al. [3]	Si	Si	Si
D-23	Bhargava, Ivanov & Donnelly [6]	No	No	No
D-27	Loscri, et al. [49]	No	No	Si
D-28	Balasubramaniam & Kangasharju [12]	No	Si	Si
D-29	Jornet & Akyildiz [30]	Si	No	No
D-33	Dressler & Kargl [55]	No	No	No

D-35	Jornet & Akyildiz [50]	Si	No	Si
D-36	Jornet & Akyildiz [25]	Si	No	Si
D-41	Akyildiz, Jornet & Pierobon [22]	Si	No	No
D-46	Akyildiz & Jornet [17]	Si	No	Si
D-47	Akyildiz & Jornet [5]	Si	No	Si
D-48	Gregori & Akyildiz [14]	Si	No	Si
D-51	Atakan & Akan [60]	Si	No	Si
D-53	Parcerisa & Akyildiz [19]	Si	No	Si
D-55	Akyildiz, Brunetti & Blázquez [13]	Si	No	Si

En la Figura 9 se ilustran los resultados de la aplicación de los criterios, se resalta que las publicaciones están más enfocadas en brindar detalles con respecto los tipos de *hardware* y arquitecturas de los sistemas loNT sobre la implementación de un *software* para la administración de los sistemas.

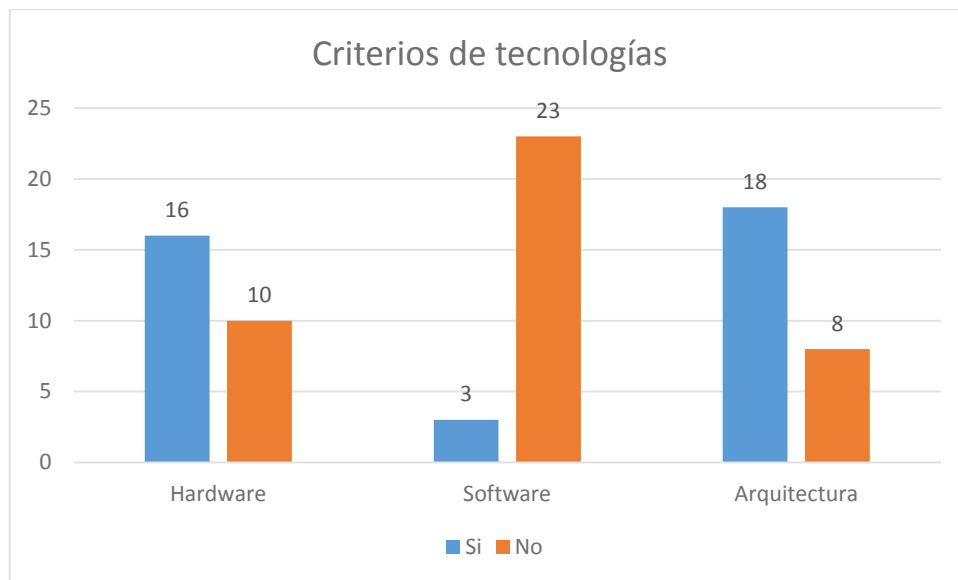


Figura 9. Resultados de criterios de tecnologías (figura de elaboración propia).

Con respecto al criterio de **hardware**, 16 de 26 publicaciones hacen énfasis en los dispositivos básicos y, más comunes que deben ser utilizados para la creación de un sistema loNT, asimismo, se destaca la importancia de la nanotecnología como base fundamental para el descubrimiento y desarrollo de los nano-dispositivos de loNT.

El criterio de **software**, 3 de 26 de las publicaciones hacen mención de la importancia de incorporar un middleware, con la finalidad de obtener una administración de los sistemas, análisis de los datos y conservación de la energía. Pero la mayoría de las publicaciones si quiera hacen mención de la necesidad de un *software*.

En cuanto al criterio de **arquitectura**, 18 de 26 documentos analizados muestran la importancia de establecer una arquitectura, principalmente destacando cuales dispositivos de *hardware* son necesarios para el establecimiento de una red de nano-sensores.

4.1.3.2. Aplicaciones de IoNT

En la categoría de aplicaciones se destacan los criterios para determinar las tendencias de los trabajos relacionados con IoNT, principalmente resaltando cuales son los trabajos desarrollados bajo ese criterio y que tienen como objetivo brindar una posible solución o mejora en ese campo.

La aplicación de los criterios se puede observar en la Tabla 10.

Tabla 10. Aplicación de criterios en la categoría de aplicaciones de IoNT.

ID	Autor	Aplicaciones		
		Cuidado de la salud	industrial	ambiental
D-1	El-din & Manjaiah [24]	No	No	No
D-2	Nayyar, Puri & Le [10]	No	No	No
D-3	Dabhi & Maheta [23]	No	No	No
D-8	Balasubramaniam, et al. [68]	No	No	No
D-10	Akkari, et al. [8]	No	No	No
D-11	Ali, Aleyadeh & Abu-Elkhair [7]	Si	No	No
D-12	Jarmakiewicz, Parobczak & Maslanka [67]	Si	No	No
D-17	Afsharinejad, Davy, Jennings [64]	No	No	Si
D-18	Ali & Abu-Elkheir [62]	Si	No	No
D-20	Dressler & Fischer [47]	Si	No	No
D-21	Miraz, Ali, Excell [2]	No	No	No
D-22	Akyildiz, et al. [3]	No	No	No
D-23	Bhargava, Ivanov & Donnelly [6]	No	Si	No
D-27	Loscri, et al. [49]	No	No	No
D-28	Balasubramaniam & Kangasharju [12]	No	No	No
D-29	Jornet & Akyildiz [30]	No	No	No
D-33	Dressler & Kargl [55]	No	No	No
D-35	Jornet & Akyildiz [50]	No	No	No
D-36	Jornet & Akyildiz [25]	No	No	No
D-41	Akyildiz, Jornet & Pierobon [22]	No	No	No
D-46	Akyildiz & Jornet [17]	No	No	No
D-47	Akyildiz & Jornet [5]	No	No	No
D-48	Gregori & Akyildiz [14]	No	No	No
D-51	Atakan & Akan [60]	No	No	No
D-53	Parcerisa & Akyildiz [19]	No	No	No
D-55	Akyildiz, Brunetti & Blázquez [13]	No	No	No

La Figura 10 contiene los resultados de la aplicación de criterios de la clasificación de aplicaciones en IoNT.

Si bien es cierto que existen múltiples áreas de aplicación que tiene IoNT en diferentes campos (ver Sección 3.5), estas no determinan la existencia de trabajos realizados y publicados en cada uno de ellos. Por el contrario, se puede observar que entre las publicaciones estudiadas se disponen únicamente de seis trabajos enfocados en la aplicación de IoNT en un área en específica.

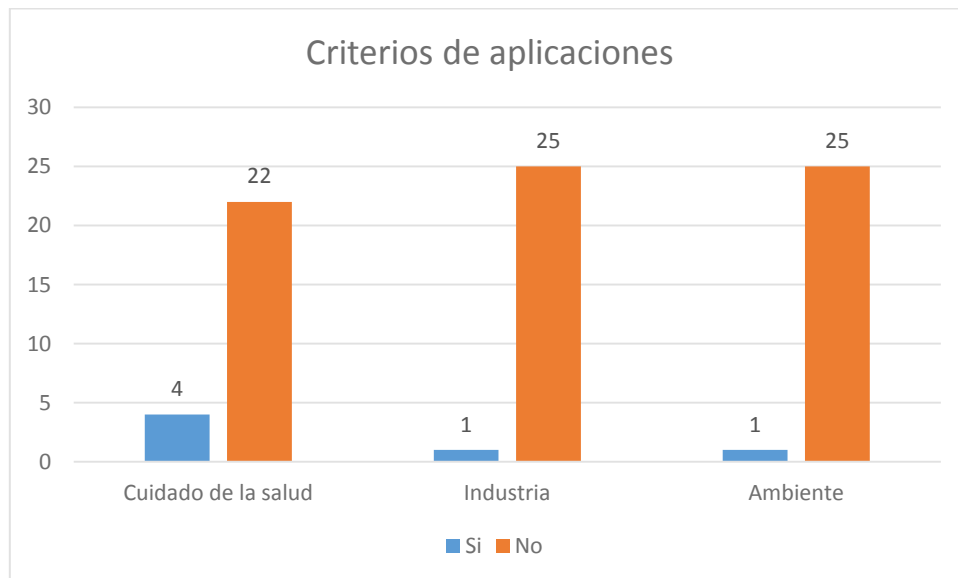


Figura 10. Resultados de criterios de aplicaciones (figura de elaboración propia).

El criterio de **cuidado de la salud**, estipula que 4 de 26 de las publicaciones (D-11, D-12, D-18 y D-20) se enfocan en el ámbito biomédico, y representa la mayor proporción de trabajos aplicados en un campo específico por parte de IoNT.

Es importante mencionar que en muchas de las publicaciones estudiadas hacen referencia a *hardware* o arquitecturas enfocadas en este criterio, pero no tienen como objetivo brindar o establecer una solución en este campo, más que brindar una visión o posibilidad para una futura aplicación.

Los criterios de aplicación de **industria** y **ambiente** indican únicamente 1 de 26 de las publicaciones estudiadas, en el caso de la **industria** (D-23) se enfoca en la agricultura lechera, consiste en un trabajo que está en proceso. Presentan a IoNT con grandes posibilidades y beneficios para la vigilancia de pastos, salud animal y reducción a la resistencia de antibióticos.

El área de **ambiente** (D-17) presenta una serie de modelos de alta resolución para el monitoreo de plantas aplicando el modelado de canales, comunicación con la banda Terahertz y nano-sensores por medio de una WNSN.

Se concreta que los mayores avances y aplicaciones de loNT se están enfocando en la salud médica, destacando entre ellos la separación de loNT en dos dominios de aplicación como lo son loBNT e loMNT.

4.1.3.3. Desafíos de loNT

En esta categoría, la Tabla 11 muestra la aplicación de los criterios con la finalidad de mostrar los desafíos más importantes a los que se enfrenta loNT.

Tabla 11. Aplicación de criterios en la categoría de desafíos.

ID	Autor	Desafíos		
		Seguridad	Privacidad	comunicación
D-1	El-din & Manjaiah [24]	Si	Si	Si
D-2	Nayyar, Puri & Le [10]	Si	Si	No
D-3	Dabhi & Maheta [23]	Si	Si	No
D-8	Balasubramaniam, et al. [68]	No	No	Si
D-10	Akkari, et al. [8]	No	No	Si
D-11	Ali, Aleyadeh & Abu-Elkhair [7]	No	No	Si
D-12	Jarmakiewicz, Parobczak & Maslanka [67]	No	No	No
D-17	Afsharinejad, Davy, Jennings [64]	No	No	Si
D-18	Ali & Abu-Elkheir [62]	No	No	Si
D-20	Dressler & Fischer [47]	Si	Si	Si
D-21	Miraz, Ali, Excell [2]	No	No	Si
D-22	Akyildiz, et al. [3]	Si	No	Si
D-23	Bhargava, Ivanov & Donnelly [6]	No	No	Si
D-27	Loscri, et al. [49]	Si	Si	Si
D-28	Balasubramaniam & Kangasharju [12]	Si	Si	Si
D-29	Jornet & Akyildiz [30]	No	No	No
D-33	Dressler & Kargl [55]	Si	Si	Si
D-35	Jornet & Akyildiz [50]	Si	Si	Si
D-36	Jornet & Akyildiz [25]	Si	Si	Si
D-41	Akyildiz, Jornet & Pierobon [22]	No	No	Si
D-46	Akyildiz & Jornet [17]	No	No	Si
D-47	Akyildiz & Jornet [5]	No	No	Si
D-48	Gregori & Akyildiz [14]	No	No	No
D-51	Atakan & Akan [60]	No	No	Si
D-53	Parcerisa & Akyildiz [19]	No	No	No
D-55	Akyildiz, Brunetti & Blázquez [13]	No	No	Si

Con respecto a los criterios de desafíos, en la Figura 11 se ilustran los resultados de la aplicación en cada uno de las publicaciones estudiadas. Resaltando en primera instancia el criterio de la **comunicación** como el mayor desafío de loNT.

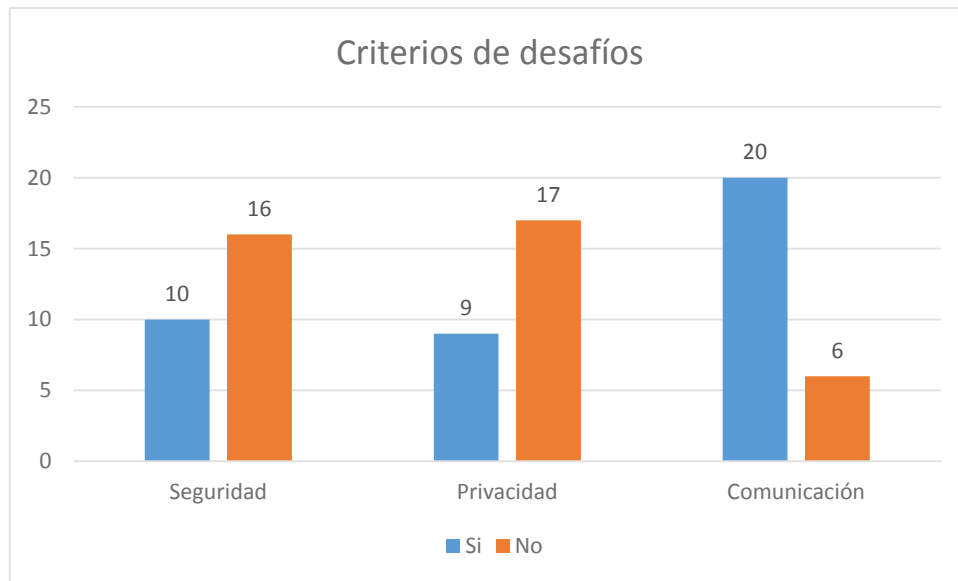


Figura 11. Resultado de criterios de desafíos (figura de elaboración propia).

Los resultados obtenidos en el criterio de **seguridad** indican que 10 de 26 de las publicaciones hacen énfasis en la importancia de la seguridad de los sistemas de loNT.

Particularmente la seguridad de los datos que son recolectados por medio de los nano-sensores, considerando necesario cumplir con los aspectos mencionados en la Sección 3.2.3, como lo son la gestión de claves, detección de intrusos, control de acceso, etc.

Para el criterio de **privacidad**, 9 de 26 de los trabajos estudiados exteriorizan la importancia de establecer nuevos y mejores mecanismos de privacidad, recordando que en las tendencias de aplicación de los sistemas loNT se encuentran ubicadas el cuidado de la salud humana.

Lo más importante de la privacidad en el campo biomédico consiste que tan pronto como los datos son recolectados del cuerpo humano se deben proteger contra los accesos no autorizados, ya que es evidente que estos son datos privados.

Basado en este criterio, en la Sección 3.2.2 se presentaron los objetivos de seguridad, que de ser cumplirlos se estaría asegurando la privacidad de los datos, pero es necesario establecer mecanismos en los que se puedan confiar, dado que la mayoría de las técnicas de seguridad actuales no se pueden implementar este tipo de sistemas debido al tamaño y capacidad.

El criterio de la **comunicación** es el más relevante de los desafíos, 20 de 26 publicaciones mencionan la importancia de establecer y consolidar los mecanismos de comunicación, principalmente por los problemas a los que se enfrentan hoy en día.

Algunos de los problemas de comunicación son: direccionamiento de nano-dispositivos, enrutamiento de información, compartir los canales de comunicación, detección de las redes y la confiabilidad.

En los últimos años se han presentado un mayor número de investigación en el campo de la comunicación, sin embargo, aún no se logran consolidar técnicas o métodos de comunicación cumpliendo con los problemas de comunicación mencionados anteriormente, más aun integrando y solucionado los entornos seguridad y privacidad.

También se debe recordar que la comunicación en loNT se enfrenta en dos dominios, tanto en la comunicación molecular como en la nano-comunicación electromagnética.

En ambos casos se resaltan los problemas de enrutamiento, en el caso de la comunicación molecular indican que las moléculas portadoras de información se mueven muy lentas y pueden perder información. En la nano-comunicación electromagnética, resalta la memoria limitada, el bajo poder computacional y la limitación de la energía.

4.1.4. Tendencias y desafíos

loNT es un paradigma cuyas investigaciones están activas y han incrementado año con año desde aquel 2010 en donde Akyildiz & Jornet hacen la primer definición.

Con base en el análisis realizado, se puede observar en la Figura 12 que 21 de 26 publicaciones se enfocan en preponderar las tecnologías y que 22 de estas 26 indican desafíos a los que se enfrentan para el establecimiento de loNT, rescatando que el mayor desafío se centra en aspectos de la comunicación.

Es totalmente razonable que las investigaciones estén enfocadas en las tecnologías y que presenten desafíos, debido a que loNT es un paradigma nuevo y no se ha establecido por completo. Los estudios se enfocan en las posibilidades y capacidades de las nanotecnologías para la implementación de *hardware* y arquitecturas tal y como se ha observado en la Sección 4.1.3.1.

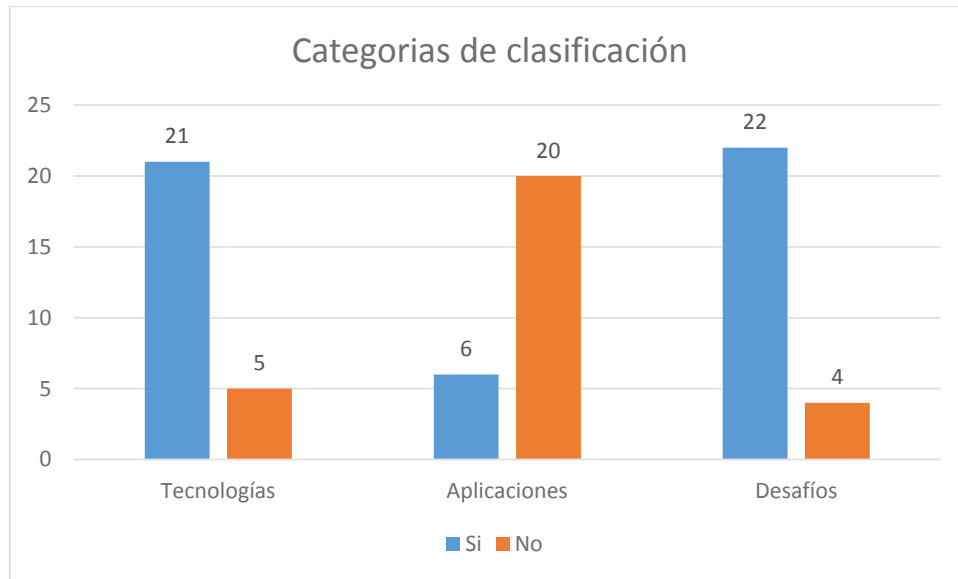


Figura 12. Categorías de clasificación (figura de elaboración propia).

Finalmente, tan solo 6 de 26 de las publicaciones se encuentran enfocadas en una aplicación a un campo en específico, siendo el cuidado de la salud (ver Sección 4.1.3.2) con mayor participación.

Es entendible que hasta el momento existan pocos trabajos concretos en loNT, debido a que es un paradigma que se encuentra en maduración y que aún se enfrenta a muchos desafíos.

CAPÍTULO V. Conclusiones y trabajos futuros

Este trabajo presenta una descripción del estado actual de loNT, analizando la literatura e identificando características, tendencias y, posibilidades, describiendo desafíos que de una u otra forma son amenazas para la difusión y establecimiento de loNT.

Se conformó una lista de referencias bibliográficas las cuales fueron clasificadas en tres categorías principales (tecnologías, aplicaciones y desafíos) y un conjunto de criterios.

loNT presenta capacidades y posibilidades para mejorar muchos aspectos de la vida de las personas. Sus principales cualidades se centran en los servicios de monitoreo y diagnóstico, lo que permitirían ayudar y mejorar la toma de decisiones y resultados en diversos campos de aplicación.

Provee una gran variedad de nano-dispositivos con diversas capacidades independiente del tipo de arquitectura que se requiera, con el objetivo de obtener datos de objetos, personas, animales, plantas, etc.

Existen muchos desafíos a los que se enfrente loNT, pero la nanotecnología provee diversos campos de estudio que avanzan cada vez con más fuerza y estas aumentan las posibilidades de solucionar los conflictos actuales.

Los temas relevantes en cuanto a privacidad, seguridad y la arquitectura de nano-redes de loNT no rigen bajo ninguna norma de estandarización internacional.

Un camino por seguir seria definir interfaces estándares en donde se incluyan protocolos y primitivas que permitan iniciar transmisiones mediante nano-dispositivos, interfaces que además se encuentren disponibles con sistemas de mayores magnitudes, con posibilidades de realizar monitoreo de las redes.

Dicho lo anterior, crear nuevos estándares permitiría establecer las comunicaciones entre los nano-dispositivos, logrando que estas normalizaciones puedan implementarse en diversas aplicaciones de loNT.

Solo el tiempo dirá cuanto durara loNT en establecerse por completo, lo que si se tiene claro que es una forma de reunir las nuevas tecnologías y que definitivamente transformara los productos y servicios en el mundo.

Resumiendo, la revisión de la literatura brindo algunos hallazgos importantes, en donde se pueden enfocar los esfuerzos de futuras investigaciones. Estas incluyen:

- La literatura de loNT se encuentra dominada por la investigación relacionada con las tecnologías loNT.
- loNT no se encuentra representada en literaturas de gestión.
- La cobertura de *software* para los sistemas de administración de loNT es escasa, prácticamente nula.
- No se establecen estándares internacionales de arquitecturas de *hardware*/red para los sistemas loNT.
- Las aplicaciones de los sistemas de loNT se encuentran enfocados principalmente en aspectos del cuidado de la salud.
- Se ha trabajado poco en cuestiones relacionadas con la seguridad y privacidad para los sistemas loNT.
- Los principales desafíos de loNT se enfocan en aspectos de comunicación, principalmente en cuestiones de enrutamiento, capacidad de procesamiento y energía.

Referencias bibliográficas

- [1] E. Sosa, D. Godoy, R. Neis, y G. Motta, «Internet del Futuro y Ciudades Inteligentes», *Cent. Investigación en Tecnologías la Inf. y Comun. CITIC- Univ. Gatón Dachary*, n.º 2, pp. 21-27, 2013.
- [2] M. Miraz, M. Ali, P. Excell, y R. Picking, «A review on Internet of Things (IoT), Internet of Everything (IoE) and Internet of Nano Things (IoNT)», en *Internet Technologies and Applications, ITA 2015*, 2015, pp. 219-224.
- [3] I. F. Akyildiz, M. Pierobon, S. Balasubramaniam, y Y. Koucheryavy, «The internet of Bio-Nano things», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, n.º 3, pp. 32-40, 2015.
- [4] A. Whitmore, A. Agarwal, y L. Da Xu, «The Internet of Things - A survey of topics and trends», *Inf. Syst. Front.*, vol. 17, n.º 2, pp. 261-274, 2015.
- [5] I. F. Akyildiz y J. Jornet, «The Internet of nano-things», *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 17, n.º 6, pp. 58-63, 2010.
- [6] K. Bhargava, S. Ivanov, y W. Donnelly, «Internet of Nano Things for Dairy Farming», *Proc. Second Annu. Int. Conf. Nanoscale Comput. Commun. - NANOCOM' 15*, pp. 1-2, 2015.
- [7] N. Ali, W. Aleyadeh, y M. Abu-Elkhair, «Internet of Nano-Things Network Models and Medical Applications», en *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2016, pp. 211-215.
- [8] N. Akkari *et al.*, «Distributed Timely Throughput Optimal Scheduling for the Internet of Nano-Things», *IEEE Internet Things J.*, vol. 3, n.º 6, pp. 1202-1212, 2016.
- [9] B. Kitchenham, «Procedures for performing systematic reviews», *Keele, UK, Keele Univ.*, vol. 33, n.º TR/SE-0401, p. 28, 2004.
- [10] A. Nayyar, V. Puri, y D.-N. Le, «Internet of Nano Things (IoNT): Next Evolutionary Step in Nanotechnology», *Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 7, n.º 1, pp. 4-8, 2017.
- [11] P. Raut y N. Sarwade, «Study of environmental effects on the connectivity of molecular communication based Internet of Nano things», *Proc. IEEE WiSPNET*, pp. 1123-1128, 2016.
- [12] S. Balasubramaniam y J. Kangasharju, «Realizing the internet of nano things: Challenges, solutions, and applications», *Computer (Long. Beach. Calif.)*, vol. 46, n.º 2, pp. 62-68, 2013.
- [13] I. F. Akyildiz, F. Brunetti, y C. Blázquez, «Nanonetworks: A new communication paradigm», *Comput. Networks*, vol. 52, n.º 12, pp. 2260-2279, 2008.
- [14] M. Gregori y I. F. Akyildiz, «A new NanoNetwork architecture using flagellated bacteria and catalytic nanomotors», *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 28, n.º 4, pp. 612-619, 2010.
- [15] B. Liu, Y. Lai, y S.-T. Ho, «High Spatial Resolution Photodetectors Based on Nanoscale Three-Dimensional Structures», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 22, n.º 12, pp. 929-931, 2010.
- [16] J. Lehtomäki, M. Hassan, y Y. Hao, «Electromagnetic Communication in Nano-scale», *Nano Commun. Netw.*, vol. 8, p. 1, 2016.
- [17] I. F. Akyildiz y J. Jornet, «Electromagnetic wireless nanosensor networks», *Nano Commun. Netw.*, vol. 1, n.º 1, pp. 3-19, 2010.
- [18] L. Parcerisa, «Molecular communication options for long range nanonetworks», Universidad Politécnica de Catalunya, 2009.
- [19] L. Parcerisa y I. F. Akyildiz, «Molecular communication options for long range nanonetworks», *Comput. Networks*, vol. 53, n.º 16, pp. 2753-2766, 2009.
- [20] K. Yang, A. Alomainy, y Y. Hao, «In-vivo characterisation and numerical analysis of the THz radio channel for nanoscale body-centric wireless networks», *2013 Usn. Radio Sci. Meet. (Joint with AP-S Symp. Usn. 2013 - Proc.)*, pp. 218-219, 2013.

- [21] Z. Xu, X. Dong, y J. Bornemann, «A statistical model for the MIMO channel with rough reflection surfaces in the THz band», *Nano Commun. Netw.*, vol. 8, pp. 25-34, 2016.
- [22] I. F. Akyildiz, J. Jornet, y M. Pierobon, «Nanonetworks: A New Frontier in Communications», *Commun. ACM*, vol. 54, n.º 11, p. 84, 2011.
- [23] K. Dabhi y A. Maheta, «Internet of Nano Things-The Next Big Thing», *IJESC*, vol. 7, n.º 4, pp. 10602-10604, 2017.
- [24] H. El-din y D. Manjaiah, «Internet of Nano Things and Industrial Internet of Things», en *Internet of Things: Novel Advances and Envisioned Applications*, vol. 25, D. P. Acharjya y M. Kalaiselvi Geetha, Eds. Springer, 2017, pp. 109-123.
- [25] J. Jornet y I. F. Akyildiz, «The internet of multimedia Nano-Things», *Nano Commun. Netw.*, vol. 3, n.º 4, pp. 242-251, 2012.
- [26] R. Smith *et al.*, «Design and fabrication of nanoscale ultrasonic transducers», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 353, n.º 1, p. 12001, 2012.
- [27] V. Sorkin y Y. W. Zhang, «Graphene-based pressure nano-sensors», *J. Mol. Model.*, vol. 17, n.º 11, pp. 2825-2830, 2011.
- [28] Y. Wu *et al.*, «High-frequency, scaled graphene transistors on diamond-like carbon», *Nature*, vol. 472, n.º 7341, pp. 74-78, 2011.
- [29] J. Jornet, «A joint energy harvesting and consumption model for self-powered nano-devices in nanonetworks», *IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 6151-6156, 2012.
- [30] J. Jornet y I. F. Akyildiz, «Graphene-based Plasmonic Nano-Antenna for Terahertz Band Communication in Nanonetworks», *IEEE J. Sel. areas Commun.*, vol. 31, n.º 12, pp. 685-694, 2013.
- [31] A. Maynard, «Nanotechnology: The next big thing, or much ado about nothing?», *Ann. Occup. Hyg.*, vol. 51, n.º 1, pp. 1-12, 2007.
- [32] R. Maynard, «Nano-technology and nano-toxicology», *Emerg. Health Threats J.*, vol. 5, n.º 1, pp. 1-8, 2012.
- [33] G. Foladori y N. Invernizzi, «La nanotecnología : una solución en busca de problemas», *Comer. Exter.*, vol. 56, n.º 1, pp. 326-334, 2006.
- [34] E. Záyago-Lau y G. Foladori, «La nanotecnología en México: un desarrollo incierto», *Econ. Soc. y Territ.*, vol. 10, n.º 32, pp. 143-178, 2010.
- [35] G. Miller y R. Senjen, «OUT OF THE LABORATORY Nanotechnology in Food & Agriculture», *Europe*, n.º March, pp. 1-68, 2008.
- [36] R. Bawa, S. R. Bawa, S. B. Maebius, T. Flynn, y C. Wei, «Protecting new ideas and inventions in nanomedicine with patents», *Nanomedicine Nanotechnology, Biol. Med.*, vol. 1, n.º 2, pp. 150-158, 2005.
- [37] S. Hornig, «Introducing Nanotechnology to the Public», en *NANOTECHNOLOGY AND THE PUBLIC Risk Perception and Risk Communication*, CRC Press, 2011, pp. 21-38.
- [38] C. Li, E. T. Thostenson, y T. W. Chou, «Sensors and actuators based on carbon nanotubes and their composites: A review», *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, n.º 6, pp. 1227-1249, 2008.
- [39] C. Yonzon, D. Stuart, X. Zhang, A. McFarland, C. Haynes, y R. Van Duyne, «Towards advanced chemical and biological nanosensors - An overview», *Talanta*, vol. 67, n.º 3, pp. 438-448, 2005.
- [40] J. Riu, A. Maroto, y F. X. Rius, «Nanosensors in environmental analysis», *Talanta*, vol. 69, n.º 2 SPEC. ISS., pp. 288-301, 2006.
- [41] OTEC, IBEC, y VHIR, «BENCHMARKING INTERNACIONAL», *Mincyt*, pp. 1-71, 2016.
- [42] M. Britto y R. Casstro, «Nanotecnología, hacia un nuevo portal científico-tecnológico»,

Química Viva, pp. 171-183, 2012.

- [43] L. Stuerzebecher, F. Fuchs, U. Zeitner, y A. Tuennermann, «High-resolution proximity lithography for nano-optical components», *Microelectron. Eng.*, vol. 132, pp. 120-134, 2015.
- [44] C. Rutherglen y P. Burke, «Nanoelectromagnetics: Circuit and electromagnetic properties of carbon nanotubes», *Small*, vol. 5, n.º 8, pp. 884-906, 2009.
- [45] A. Llopis-Lorente *et al.*, «Interactive models of communication at the nanoscale using nanoparticles that talk to one another», *Nat. Commun.*, vol. 8, n.º May, p. 15511, 2017.
- [46] N. Takeuchi y M. Mora, «Divulgación y formación en nanotecnología en México», *Mundo Nano*, vol. 4, n.º 2, pp. 59-64, 2011.
- [47] F. Dressler y S. Fischer, «Connecting in-body nano communication with body area networks: Challenges and opportunities of the Internet of Nano Things», *Nano Commun. Netw.*, vol. 6, n.º 2, pp. 29-38, 2015.
- [48] F. Dressler y F. Kargl, «Security in nano communication: Challenges and open research issues», en *IEEE International Conference on Communications*, 2012, pp. 6183-6187.
- [49] V. Loscri, C. Marchal, N. Mitton, G. Fortino, y A. Vasilakos, «Security and privacy in molecular communication and networking: Opportunities and challenges», en *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 2014, vol. 13, n.º 3, pp. 198-207.
- [50] J. Jornet y I. F. Akyildiz, «The Internet of Multimedia Nano-Things in the Terahertz Band», en *European Wireless*, 2012.
- [51] D. Djenouri, L. Khelladi, y N. Badache, «A survey of security issues in mobile ad hoc and sensor networks», *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 7, n.º 4, pp. 2-28, 2005.
- [52] A. Ahmed, K. Bakar, M. Channa, K. Haseeb, y A. Khan, «A survey on trust based detection and isolation of malicious nodes in ad-hoc and sensor networks», *Front. Comput. Sci.*, vol. 9, n.º 2, pp. 280-296, 2015.
- [53] P. Ceminari, A. Arelovich, y M. Di Federico, «Diseño de tres arquitecturas para un módulo criptográfico AES», en *Biennial Congress of Argentina, ARGENCON 2016*, 2016.
- [54] F. Solís, D. Pinto, y S. Solís, «Seguridad de la información en el intercambio de datos entre dispositivos móviles con sistema Android utilizando el método de encriptación RSA», *Enfoque UTE*, vol. 8, n.º 1, pp. 160-171, 2017.
- [55] F. Dressler y F. Kargl, «Towards security in nano-communication: Challenges and opportunities», *Nano Commun. Netw.*, vol. 3, n.º 3, pp. 151-160, 2012.
- [56] R. Shirey, «Internet Security Glossary, Version 2», *IETF*, 2007. [En línea]. Disponible en: <https://tools.ietf.org/html/rfc4949?ref=driverlayer.com>.
- [57] F. Gandino, C. Celozzi, y M. Rebaudengo, «A Key Management Scheme for Mobile Wireless Sensor Networks», *Appl. Sci.*, vol. 7, n.º 5, p. 490, 2017.
- [58] K. Kalkan y A. Levi, «Key distribution scheme for peer-to-peer communication in mobile underwater wireless sensor networks», *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, pp. 698-709, 2012.
- [59] L. Eschenauer y V. Gligor, «A key-management scheme for distributed sensor networks», *Proc. 9th ACM Conf. Comput. Commun. Secur.*, pp. 41-47, 2002.
- [60] B. Atakan y O. Akan, «Carbon nanotube-based nanoscale ad hoc networks», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, n.º 6, pp. 129-135, 2010.
- [61] C. Dimitrakakis y A. Mitrokotsa, «Distance-Bounding Protocols: Are You Close Enough?», *IEEE Secur. Priv.*, vol. 13, n.º 4, pp. 47-51, 2015.
- [62] N. Ali y M. Abu-Elkheir, «Internet of nano-things healthcare applications: Requirements, opportunities, and challenges», *2015 IEEE 11th Int. Conf. Wirel. Mob. Comput. Netw. Commun. WiMob 2015*, pp. 9-14, 2015.

- [63] H.-L. Hung, H.-C. Hsu, S.-L. Shu, y J.-H. Wen, «On the performance of a rapid synchronization algorithm for IR-UWB receivers», *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, n.º 2012, pp. 557–564, 2012.
- [64] A. Afsharinejad, A. Davy, B. Jennings, y C. Brennan, «Performance analysis of plant monitoring nanosensor networks at THz frequencies», *IEEE Internet Things J.*, vol. 3, n.º 1, pp. 59-69, 2016.
- [65] M. Hegg y L. Lin, «Nano-scale nanocrystal quantum dot photodetectors», en *Conference on Lasers and Electro-Optics, 2007, CLEO 2007*, 2007, vol. 2, pp. 10-11.
- [66] B. Kaviani, A. Sadr, y A. Abrishamifar, «Generation and detection of nano ultrasound waves with a multiple strained layer structure», *Opt. Quantum Electron.*, vol. 40, n.º 8, pp. 577-586, 2008.
- [67] J. Jarmakiewicz, K. Parobczak, y K. Maslanka, «On the Internet of Nano Things in healthcare network», *2016 Int. Conf. Mil. Commun. Inf. Syst. ICMCIS 2016*, 2016.
- [68] S. Balasubramaniam, J. Jornet, M. Pierobon, y Y. Koucheryavy, «Guest editorial special issue on the internet of nano things», *IEEE Internet Things J.*, vol. 3, n.º 1, pp. 1-3, 2016.

Anexos

Anexo I. Lista de documentos seleccionados

Tabla 12. Lista de documentos seleccionados

ID	Autor/es	Año	Fuente	País
1	El-din & Manjaiah	2017	SpringerLink	India
2	Peper, Leibnitz, Teramae et al.	2016	IEEE	Japón
3	Balasubramaniam, Jornet, Pierobon et al.	2016	IEEE	Australia, España e Italia
4	Lehtomäk, Hassan & Hao	2016	ScienceDirect	
5	Akkari, Wang, Jornet et al.	2016	IEEE	Líbano, China y España
6	Ali, Aleyadeh & AbuElkhair	2016	IEEE	UAE, Jordania y Egipto
7	Jarmakiewicz, Parobczak & Maslanka	2016	IEEE	Polonia
8	Raut & Sarwade	2016	IEEE	India
9	Ali & Abu-Elkheir	2015	IEEE	UAE y Egipto
10	Whitmore, Agarwal & Da Xu	2015	Springer Link	USA
11	Dressler & Fischer	2015	ScienceDirect	Alemania
12	Miraz, Ali, Excell et al.	2015	IEEE	Reino Unido
13	Akyildiz, Pierobon, Balasubramaniam et al.	2015	IEEE	Alemania, Finlandia e Italia
14	Loscri, Marchal, Mitton et al.	2014	IEEE	Italia , Francia y Francia
15	Balasubramaniam & Kangasharju	2013	IEEE	Finlandia
16	Jornet & Akyildiz	2013	IEEE	España y Alemania
17	Dressler & Kargl	2012	IEEE	Austria, Alemania/Holanda
18	Dressler & Kargl	2012	ScienceDirect	Austria y Alemania/Holanda
19	Jornet	2012	IEEE	España
20	Jornet & Akyildiz	2012	IEEE	España y Alemania
21	Jornet & Akyildiz	2012	ScienceDirect	España y Alemania
22	Akyildiz, Jornet & Pierobon	2011	ScienceDirect	Alemania, España e Italia
23	Akyildiz & Jornet	2010	ScienceDirect	Alemania y España
24	Akyildiz & Jornet	2010	IEEE	Alemania y España
25	Akyildiz, Brunetti & Blázquez	2008	ScienceDirect	Alemania, España y España

Anexo II. Lista total de documentos seleccionados

Tabla 13. Lista total de documentos seleccionados.

ID	Autor/es	Año	Fuente	País
D-1	El-din & Manjaiah	2017	SpringerLink	India
D-2	Nayyar, Puri & Le	2017	Otro	India, india y Vietnam
D-3	Dabhi & Maheta	2017	Otro	India
D-4	Llopis-Lorente, Díez, Sánchez et al.	2017	Otro	España
D-5	Solís, Pinto & Solís	2017	Otro	Ecuador
D-6	Gandino, Celozzi & Rebaudengo	2017	Otro	Italia
D-7	Peper, Leibnitz, Teramae et al.	2016	IEEE	Japón
D-8	Balasubramaniam, Jornet, Pierobo et al.	2016	IEEE	Australia, España e Italia
D-9	Lehtomäk, Hassan & Hao	2016	ScienceDirect	
D-10	Akkari, Wang, Jornet et al.	2016	IEEE	Líbano, China y España
D-11	Ali, Aleyadeh & AbuElkhair	2016	IEEE	UAE, Jordania y Egipto
D-12	Jarmakiewicz, Parobczak & Maslanka	2016	IEEE	Polonia
D-13	Raut & Sarwade	2016	IEEE	India
D-14	Xu, Dong & Bornemann	2016	ScienceDirect	China, China y Alemania
D-15	OTEC, IBEC & VHIR	2016	Otro	Argentina
D-16	Ceminari, Arelovich & Di Federico	2016	Otro	Argentina
D-17	Afsharinejad, Davy, Jennings et al.	2016	IEEE	Irlanda
D-18	Ali & Abu-Elkheir	2015	IEEE	UAE y Egipto
D-19	Whitmore, Agarwal & Da Xu	2015	Springer Link	USA
D-20	Dressler & Fischer	2015	ScienceDirect	Alemania
D-21	Miraz, Ali, Excell et al.	2015	IEEE	Reino Unido
D-22	Akyildiz, Pierobon, Balasubramani et al.	2015	IEEE	Alemania, Finlandia e Italia
D-23	Bhargava, Ivanov & Donnelly	2015	Otro	Irlanda
D-24	Ahmed, Bakar, Channa et al.	2015	Otro	Malasia, Malasia y Pakistan
D-25	Dimitrakakis & Mitrokotsa	2015	IEEE	Suecia
D-26	Stuerzebecher, Fuchs, Zeitner et al.	2015	ScienceDirect	Alemania
D-27	Loscri, Marchal, Mitton et al.	2014	IEEE	Italia, Francia y Francia
D-28	Balasubramaniam & Kangasharju	2013	IEEE	Finlandia
D-29	Jornet & Akyildiz	2013	IEEE	España y Alemania
D-30	Sosa, Godoy, Neis et al.	2013	Otro	Argentina
D-31	Yang, Alomainy & Hao	2013	Otro	Reino Unido
D-32	Dressler & Kargl	2012	IEEE	Austria y Alemania/Holanda

D-33	Dressler & Kargl	2012	ScienceDirect	Austria y Alemania/Holanda
D-34	Jornet	2012	IEEE	España
D-35	Jornet & Akyildiz	2012	IEEE	España y Alemania
D-36	Jornet & Akyildiz	2012	ScienceDirect	España y Alemania
D-37	Smith, Arca, Chen et al.	2012	Otro	Reino Unido
D-38	Maynard, R.	2012	Otro	Reino Unido
D-39	Kalkan & Levi	2012	Springer Link	Turquía
D-40	Hung, Hsu, Shu et al.	2012	Otro	Taiwán
D-41	Akyildiz, Jornet & Pierobon	2011	ScienceDirect	Alemania, España e Italia
D-42	Sorkin & Zhang	2011	Springer Link	Singapur
D-43	Wu, Lin, Bol et al.	2011	Otro	Japón
D-44	Hornig Priest	2011	Otro	USA
D-45	Takeuchi & Mora	2011	Otro	México
D-46	Akyildiz & Jornet	2010	ScienceDirect	Alemania y España
D-47	Akyildiz & Jornet	2010	IEEE	Alemania y España
D-48	Gregori & Akyildiz	2010	IEEE	España y Alemania
D-49	Liu, Lai & Ho	2010	IEEE	Singapur
D-50	Záyago-Lau & Foladori	2010	Otro	México
D-51	Atakan & Akan	2010	IEEE	Turquía
D-52	Parcerisa	2009	Otro	España
D-53	Parcerisa & Akyildiz	2009	ScienceDirect	España y Alemania
D-54	Rutherglen & Burke	2009	Otro	USA
D-55	Akyildiz, Brunetti & Blázquez	2008	ScienceDirect	Alemania, España y España
D-56	Miller & Senjen	2008	Otro	Australia
D-57	Li, Thostenson & Chou	2008	ScienceDirect	USA
D-58	Kaviani, Sadr & Abrishamifar	2008	Springer link	Iran
D-59	Shirey	2007	Otro	USA
D-60	Hegg & Lin	2007	Otro	USA
D-61	Maynard, A.	2006	Otro	USA
D-62	Foladori & Invernizzi	2006	Otro	México
D-63	Riu, Maroto & Rius	2006	ScienceDirect	España
D-64	Bawa, Bawa, Maebius et al.	2005	ScienceDirect	USA
D-65	Yonzon, Stuart, Zhang et al.	2005	ScienceDirect	USA
D-66	Djenouri, Khelladi & Badache	2005	IEEE	Algeria
D-67	Eschenauer & Gligor	2002	Otro	USA

Anexo III. Lista de evaluación de documentos seleccionados

[PI-1]: ¿Define el término de loNT?

[PI-2]: ¿Describe características loNT?

[PI-3]: ¿Indica prácticas relacionadas de loNT?

[PI-4]: ¿Exterioriza las posibilidades y tendencias de loNT?

Tabla 14. Lista de evaluación de documentos seleccionados.

ID	Autor/es	PI-1	PI-2	PI-3	PI-4
D-1	El-din & Manjaiah	Si	Si	Si	Si
D-2	Nayyar, Puri & Le	No	Si	Si	Si
D-3	Dabhi & Maheta	Si	Si	Si	Si
D-4	Llopis-Lorente, Díez, Sánchez et al.	No	No	Si	No
D-5	Solís, Pinto & Solís	No	No	Si	No
D-6	Gandino, Celozzi & Rebaudengo	No	No	Si	No
D-7	Peper, Leibnitz, Teramae et al.	No	Si	Si	No
D-8	Balasubramaniam, Jornet, Pierobon et al.	No	Si	Si	Si
D-9	Lehtomäk, Hassan & Hao	No	No	Si	No
D-10	Akkari, Wang, Jornet et al.	No	Si	Si	Si
D-11	Ali, Aleyadeh & AbuElkhair	Si	Si	Si	Si
D-12	Jarmakiewicz, Parobczak & Maslanka	No	Si	Si	No
D-13	Raut & Sarwade	Si	Si	Si	No
D-14	Xu, Dong & Bornemann	No	No	Si	No
D-15	OTEC, IBEC & VHIR	No	No	Si	No
D-16	Ceminari, Arelovich & Di Federico	No	No	Si	No
D-17	Afsharinejad, Davy, Jennings et al.	No	Si	Si	Si
D-18	Ali & Abu-Elkheir	Si	Si	Si	Si
D-19	Whitmore, Agarwal & Da Xu	Si	No	Si	No
D-20	Dressler & Fischer	No	Si	Si	Si
D-21	Miraz, Ali, Excell et al.	Si	Si	Si	Si
D-22	Akyildiz, Pierobon, Balasubramaniam et al.	No	Si	Si	Si
D-23	Bhargava, Ivanov & Donnelly	Si	Si	Si	Si
D-24	Ahmed, Bakar, Channa et al.	No	No	Si	No
D-25	Dimitrakakis & Mitrokotsa	No	No	Si	No
D-26	Stuerzebecher, Fuchs, Zeitner et al.	No	No	Si	No
D-27	Loscri, Marchal, Mitton et al.	No	Si	Si	Si

D-28	Balasubramaniam & Kangasharju	Si	Si	Si	Si
D-29	Jornet & Akyildiz	No	Si	Si	No
D-30	Sosa, Godoy, Neis et al.	No	No	Si	No
D-31	Yang, Alomainy & Hao	No	No	Si	No
D-32	Dressler & Kargl	No	No	Si	No
D-33	Dressler & Kargl	No	Si	Si	Si
D-34	Jornet	No	No	Si	No
D-35	Jornet & Akyildiz	No	Si	Si	Si
D-36	Jornet & Akyildiz	No	Si	Si	Si
D-37	Smith, Arca, Chen et al.	No	No	Si	No
D-38	Maynard, R.	No	No	Si	No
D-39	Kalkan & Levi	No	No	Si	No
D-40	Hung, Hsu, Shu et al.	No	No	Si	No
D-41	Akyildiz, Jornet & Pierobon	No	Si	Si	Si
D-42	Sorkin & Zhang	No	No	Si	No
D-43	Wu, Lin, Bol et al.	No	No	Si	No
D-44	Hornig Priest	No	No	Si	No
D-45	Takeuchi & Mora	No	No	Si	No
D-46	Akyildiz & Jornet	No	Si	Si	Si
D-47	Akyildiz & Jornet	Si	Si	Si	Si
D-48	Gregori & Akyildiz	No	Si	Si	No
D-49	Liu, Lai & Ho	No	No	Si	No
D-50	Záyago-Lau & Foladori	No	No	Si	No
D-51	Atakan & Akan	No	Si	Si	No
D-52	Parcerisa	No	No	Si	No
D-53	Parcerisa & Akyildiz	No	Si	Si	No
D-54	Rutherglen & Burke	No	No	Si	No
D-55	Akyildiz, Brunetti & Blázquez	No	Si	Si	Si
D-56	Miller & Senjen	No	No	Si	No
D-57	Li, Thostenson & Chou	No	No	Si	No
D-58	Kaviani, Sadr & Abrishamifar	No	No	Si	No
D-59	Shirey	No	No	Si	No
D-60	Hegg & Lin	No	No	Si	No
D-61	Maynard, A.	No	No	Si	No
D-62	Foladori & Invernizz	No	No	Si	No

D-63	Riu, Maroto & Rius	No	No	Si	No
D-64	Bawa, Bawa, Maebius et al.	No	No	Si	No
D-65	Yonzon, Stuart, Zhang et al.	No	No	Si	No
D-66	Djenouri, Khelladi & Badache	No	No	Si	No
D-67	Eschenauer & Gligor	No	No	Si	No